

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Ústav letecké dopravy

Snímače malých frekvencí a malých amplitud

Sensors of Small Frequencies and Small Amplitudes

Student: Tomáš Přechek

Vedoucí bakalářské práce: Ing. František Martinec, CSc.

Ostrava 2013

## Zadání bakalářské práce

Student: **Tomáš Přechek**

Studijní program: B3712 Technologie letecké dopravy

Studijní obor: 3708R036 Technologie letecké dopravy

Téma: Snímače malých frekvencí a malých amplitud  
Sensors of Small Frequencies and Small Amplitudes

### Zásady pro vypracování:

1. Analýza možností měření malých frekvencí a malých amplitud generované lidským organismem elektrickými přístroji na dálku.
2. Vyhodnocení možností měření malých frekvencí a malých amplitud na dálku.
3. Návrh a výběr snímačů malých frekvencí a malých amplitud na dálku.

### Seznam doporučené odborné literatury:

Siegfried Wirsum: Abeceda NF techniky, BEN - technická literatura, 2002, ISBN 80-86056-26-0.  
<http://www.elektrorevue.cz/clanky/04051/index.html>

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. František Martinec, CSc.**

Datum zadání: 14.12.2012

Datum odevzdání: 20.05.2013



doc. Ing. Aleš Slíva, Ph.D.  
vedoucí katedry

doc. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.  
děkan fakulty

### Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.



V Ostravě 20. května 2013

Tomáš Přechek

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.

- беру на ве́домі, же Высoкá школа ба́ньскá – Техни́кá универзи́та Остра́ва (да́ле же́н „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).

- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.

- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.

- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).

- беру на ве́домі, же оdevздáні́м své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 20. května 2013



podpis

Tomáš Přechek  
Místecká 141  
739 21 Paskov

## **Poděkování**

Rád bych tímto poděkoval panu Ing. Františku Martincovi, CSc. za cenné připomínky, odborné rady a náměty, které mi pomohly při tvorbě této bakalářské práce.

## ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

PŘEČEK, T. *Snímače malých frekvencí a amplitud: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Institut dopravy, 2012, 55 s. Vedoucí práce: Martinec, F.

Tato bakalářská práce pojednává o možnostech snímání a měření nízkých frekvencí na dálku. Pomocí metod popsaných v této práci jsme reálně schopni nejen snímat tyto nízké frekvence, ale také zjišťovat směr příchozího vlnění a následně klasifikovat. Práce je rozdělena do 6 kapitol, přičemž první pojednává obecně o problematice elektroakustiky, v druhé jsou rozděleny a detailně popsány druhy snímačů vč. jejich charakteristik. Třetí kapitola nahlíží do problematiky bezdrátových systémů snímačů a rádiového přenosu. V další kapitole jsou popsány samotné možnosti měření frekvencí a dále i analýza možnosti zjištění směru příchozího vlnění pomocí pole několika snímačů. Samotný výběr vhodných snímačů a návrh vlastního řešení při použití na bezpilotních letounech jsou popsány v kapitole poslední. Najdeme zde jak specifikace vybraných snímačů, tak popis jejich výhod a možností použití.

## ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

PŘEČEK, T. *Sensors of Small Frequencies and Small Amplitudes*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Transport, 2012, 55 p. Thesis head: Martinec, F.

This bachelor thesis deals with possibilities of sensing and measuring low frequencies at a distance. Using the methods described in this work, we really can not only sense these low frequencies, but also detect the direction of incoming waves and then classify them. The work is divided into six chapters, the first will discuss the general topic of electroacoustics in the second are divided and described in detail types of sensors, including their characteristics. The third chapter discusses wireless systems of sensors and radio transmission. In the next chapter are described actual possibility of measuring frequency and an analysis of options determine the direction of incoming waves using an array of multiple sensors. The choice of appropriate sensors and design a custom solution using the unmanned aircrafts are described in the last chapter. We can find the specifications of selected sensors, and the description of their advantages and application possibilities.

# OBSAH

Cíl práce.....	10
1 Úvod.....	11
2 Elektroakustika.....	12
2.1 Zvuk.....	12
2.1.1 Intenzita zvuku.....	13
2.1.2 Hluk.....	13
2.1.3 Hladina intenzity zvuku .....	13
2.1.4 Hladina akustického tlaku .....	14
2.2 Elektroakustický řetězec.....	14
2.3 Elektroakustický měnič.....	17
3 Mikrofony.....	18
3.1 Princip přeměny akustického signálu na elektrický.....	18
3.2 Směrové charakteristiky.....	18
3.2.1 Typy směrových charakteristik.....	19
3.2.2 Srovnání vlastností jednotlivých směrových charakteristik.....	21
3.3 Frekvenční charakteristika.....	21
3.4 Elektrické charakteristiky mikrofonů.....	22
3.4.1 Citlivost.....	22
3.4.2 Impedance.....	22
3.4.3 Šum.....	23
3.4.4 Odstup rušivých signálů.....	23
3.5 Typy mikrofonů.....	23
3.5.1 Uhlíkové mikrofony.....	24
3.5.2 Elektrodynamické mikrofony.....	25
3.5.3 Elektromagnetické mikrofony.....	26
3.5.4 Elektrostatické mikrofony.....	27

3.5.5 Elektrové mikrofony.....	28
3.5.6 Piezoelektrické – krystalové mikrofony.....	28
3.6 Speciální mikrofony.....	29
3.7 Bezdrátové mikrofony.....	30
4 Měření Frekvence.....	31
4.1 Číslicové měření frekvence.....	31
4.1.1 Přímé měření frekvence.....	31
4.1.2 Měření časového intervalu.....	32
4.2 Měření frekvence pomocí osciloskopu.....	33
4.3 Měření nízkých frekvencí pomocí sondy.....	35
5 Lokalizace zdroje nízkofrekvenčního signálu v 3D prostoru.....	36
5.1 Metoda časových zpoždění.....	37
5.2 Formulace problému v trojrozměrném prostoru.....	38
6 Návrh a výběr snímačů.....	40
6.1 Kritéria pro výběr snímačů při různých použití na bezpilotních letounech.....	40
6.1.1 Směrové charakteristiky.....	40
6.1.2 Frekvenční rozsah.....	41
6.1.3 Elektrické charakteristiky.....	41
6.1.4 Konstrukce a hmotnost.....	42
6.1.5 Množství a cena.....	42
6.2 Výběr snímačů pro použití na bezpilotních letounech.....	43
6.2.1 Princip vybraných snímačů.....	44
6.2.2 Směrovost vybraných snímačů.....	45
6.2.3 Specifikace vybraných snímačů.....	46
6.2.4 Seznam vybavení k vybraným snímačům.....	47
6.2.5 Připojení vybraných snímačů s napájecí jednotkou.....	48
6.2.6 Specifikace jednotky pro úpravu signálu ze snímačů.....	49



6.2.7 Připojení snímačů na bezpilotní letoun.....	50
6.2.8 Hlavní výhody vybraného systému snímačů.....	51
6.3 Zpracování a vyhodnocení naměřených dat.....	52
6.4 Další možnosti využití vybraných snímačů.....	54
6.4.1 Přistávací asistent.....	54
6.4.2 Protisrážkový systém.....	55
6.4.3 Snímač turbulencí.....	55
6.4.4 Snímání rychlosti.....	56
6.5 Použitelnost dalších vybraných snímačů.....	56
7 Závěr.....	58
8 Zhodnocení cíle práce.....	60
Seznam tabulek.....	61
Seznam obrázků.....	62
Seznam použité literatury.....	64
Seznam příloh.....	66

## CÍL PRÁCE

Cílem této bakalářské práce je seznámení se s problematikou možností měření malých frekvencí na dálku. Pro možnou analýzu měření a výběr snímačů malých frekvencí je dále cílem seznámení se se základními vlastnostmi nízkofrekvenčních signálů, jejich charakteristikami, jednotlivými druhy jejich snímačů a možnostmi zpracování snímaných signálů.

Práce by měla obsahovat také samotný výběr vhodných snímačů a návrh vlastního řešení při použití na bezpilotních letounech, založený na porovnání kritérií na snímače kladených. Pro praktické využití je také cílem navrhnout možnost zpracování těchto signálů s ukázkou použití.

Komplexně by tato práce měla poskytnout čtenáři dostatek informací pro zvážení využití vybraných snímačů a seznámit ho s možnostmi jejich využití pro snímání nízkých frekvencí na dálku.

# 1 ÚVOD

Tato bakalářská práce analyzuje problematiku měření nízkofrekvenčních signálů, jejich vlastností, zpracování a přenosu na dálku. Je rozdělena do 5 kapitol, přičemž teoretická část, představující kapitoly 1 až 3, objasňuje čtenáři základní principy a vlastnosti elektroakustiky jako komplexní vědy, zabývající se příjmem, přenosem, uchováváním a reprodukcí akustických signálů ve slyšitelné oblasti.

Rozebrány jsou detailně jednotlivé typy snímačů a jmenovány jejich základní charakteristiky, na kterých se bude zakládat v praktické části vlastní výběr vhodných snímačů pro snímání na dálku. Především se jedná o charakteristiky směrové, které nás informují o zisku snímačů v daném směru, jejich citlivost, hmotnost, cena atd.

Teoretická část, krom toho dále popisuje v obecné rovině možnosti následného zpracování a měření pomocí běžných přístrojů, se kterými se můžeme v praxi setkat. Detailněji je rozebíráno měření číslicové, měření pomocí osciloskopu či akustické sondy.

Obsažena je zde také analýza možnosti lokalizace zdroje nízkofrekvenčního vlnění v trojrozměrném prostoru. Pomocí metody časových zpoždění jsme schopni zjistit prostorové úhly a směr vektoru přicházejícího vlnění pomocí pole více mikrofónů. K výpočtu těchto úhlů vektoru přicházejícího vlnění je využit software, který v reálném čase vyhodnocuje časovou odchylku přijímaných signálů z jednotlivých snímačů z níž pomocí komplikovaných matematických výpočtů dodává uživateli informaci o směru přicházejícího vlnění s relativně dobrou přesností.

Praktická část této práce obsahuje vlastní řešení pro použití nízkofrekvenčních snímačů na bezpilotních letounech (UAV) pro využití snímání nízkých frekvencí na dálku.

V první řadě jsou rozebrány jednotlivá kritéria pro výběr snímačů, vhodných pro tyto účely. Na základě těchto kritérií je vybráno několik konkrétních typů snímačů nízkých frekvencí a v tabulkovém přehledu po porovnání jejich vlastností vybrány spolu s opodstatněním nejvhodnější, které jsou dále popisovány detailněji. Především pak jejich princip, specifikace, možnosti připojení na letoun a způsobu měření s jejich pomocí.

V závěru této práce jsou shrnuty dosažené výsledky vyplývající z praktické části spolu s návrhem konkrétních typů snímačů a srovnání jejich výhod při daném použití a dále také obecný pohled na problematiku měření nízkých frekvencí na dálku pomocí UAV a nadhozena témata, týkající se této problematiky, která je nutno v této věci v ještě dořešit.

## 2 ELEKTROAKUSTIKA

Je vědní obor, spojující akustiku s některými elektrotechnickými a elektronickými disciplínami. Zahrnuje všechny obory, které se zabývají příjmem, přenosem, uchováváním a reprodukcí akustických signálů ve slyšitelné oblasti. Využitím elektroakustiky v našem životě je široké, například jednoduchá spotřební elektronika, hifi technika, telekomunikační přístroje.[3]

Elektroakustické systémy plní obecně tyto 3 základní funkce:

1. Převod akustického signálu na elektrický
2. Následná úprava elektrických signálů jako zesílení, kmitočtová korekce, směšování, záznam a reprodukce
3. Převod elektrického signálu zpět na akustický

### 2.1 Zvuk

Z fyzikálního hlediska je zvuk mechanické vlnění související s kmitáním pružných prostředí (plyny, kapaliny nebo pevné látky) doprovázené zhušťováním a zředováním částic.

Obecně se jedná o součást životního prostředí, která tvoří důležitou složku pro spojení lidí i živočichů s okolím a mezi sebou. [1]

Rychlost šíření zvuku je dána druhem prostředí a jeho teplotou. Pro rychlost zvuku ve vzduchu při teplotě  $t[^\circ\text{C}]$  platí tento vztah

$$v_t = 331,82 \cdot 0,61 t \quad [\text{m} \cdot \text{s}^{-1}]$$

Prostředí a teplota [ $^\circ\text{C}$ ]	Rychlost [ $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ]
Vzduch (13,41)	340
Voda (25)	1500
Helium (25)	965
Rtuť (25)	1450
Ocel	5000

**Tab. 2.1** Rychlost šíření zvuku v některých prostředích

Z hlediska frekvence se udává jako slyšitelné pásmo (audio-frekvenční pásmo) rozsah 16Hz až 20kHz. V tomto pásmu probíhá lidská řeč, hudba, ale i hluk, vznikající jako

doprovodný jev lidské činnosti. Ze strany nízkých kmitočtů sousedí se slyšitelným pásmem infrazvuk a ze strany vysokých kmitočtů pak ultrazvuk. V závislosti na frekvenci se mění délka vlny zvuku dle vzorce: [4]

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad [\text{m}; \text{m.s}^{-1}, \text{Hz}]$$

### 2.1.1 Intenzita zvuku

Intenzita zvuku je fyzikální veličina, udávající energii odpovídající akustickému výkonu  $\Delta P$  přeneseného na plochu  $\Delta S$ :

$$I = \frac{\Delta P}{\Delta S} \quad [\text{W.s}^{-2}]$$

Na základě citlivosti lidského ucha zavádíme tzv. práh slyšení a práh bolesti. Práh slyšení je nejmenší hodnota intenzity zvuku, kterou dokáže člověk vnímat a je rovna hodnotě  $10^{-12} \text{W.s}^{-2}$ . Práh bolesti určuje naopak hodnotu maximální, která již způsobuje bolesti a při jejím působení dochází k poškození ucha.

### 2.1.2 Hluk

Jedná se o specifickou formu zvuku, kterou charakterizujeme jako nepravidelné nebo náhodné kmitání. Z hlediska subjektivního vnímání se jedná o rušivý, nežádoucí či škodlivý zvuk ovlivňovaný množstvím faktorů (hlasitostí, dobou trvání, informačním obsahem či zdravotním stavem člověka).

### 2.1.3 Hladina intenzity zvuku

Hladina intenzity (hlasitosti) zvuku je vyjádřena logaritmickou stupnicí a dána poměrem nejmenší a největší intenzity zvuku v oblasti největší citlivosti ucha.

Jednotkou hlasitosti zvuku je bel [B]. Tato jednotka byla nazvána podle vynálezce telefonu, Američana Alexandra Grahama Bella (1847 - 1922). Jedná se o jednotku velkou, proto se v praxi používají jednotky nižší - decibel [dB]. Rozlišovací schopnost lidského ucha je řádově právě 1 dB. [7]

Vztah pro výpočet hladiny intenzity zvuku, kde  $I$  je intenzita zvuku a  $I_0$  je intenzita prahu slyšení ( $10^{-12} \text{ W} \cdot \text{s}^{-2}$ ):

$$L_I = 10 \log \left( \frac{I}{I_0} \right) \quad [\text{dB}]$$

Zdroje zvuku	Hladina intenzity zvuku [dB]
Práh slyšení	0
Šum listí při slabém větru	10
Klidná zahrada	20
Tichý šepot	30
Klidná knihovna	40
Pouliční hluk	50
Hlasitý hovor	60
Hlučný hostinec	70
Slině reprodukováná hudba	80
Jedoucí vlak	90
Pneumatická sbíječka	100
Diskotéka	110
Startující letadlo	120
Práh bolesti	130
Akustické trauma	140

**Tab. 2.2** Přehled hodnot hladin intenzity zvuku

#### 2.1.4 Hladina akustického tlaku

Míru akustické intenzity lze vyjádřit jako hladinu akustického tlaku  $L_p$ . Je dána logaritmičtým vyjádřením poměru skutečné hodnoty tlaku  $p$  a hodnoty tlaku prahu slyšení  $p_0$  ( $20 \mu\text{Pa}$ ): [4]

$$L_p = 20 \log \left( \frac{p}{p_0} \right) \quad [\text{dB}]$$

Hladina akustické intenzity a hladina akustického tlaku si nejsou zcela rovny, protože pro obě veličiny jsou stanoveny nezávisle referenční hodnoty  $I_0$  a  $p_0$ .

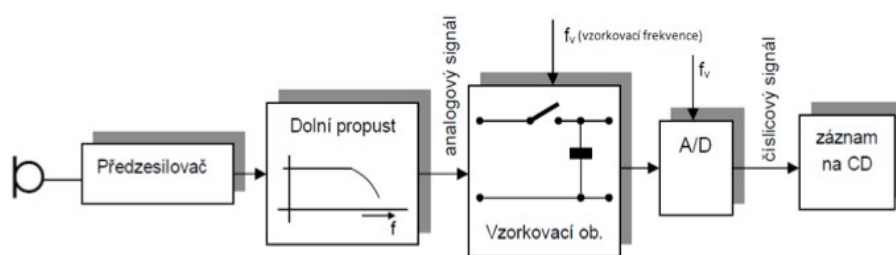
## 2.2 Elektroakustický řetězec

Elektroakustický přenosový řetězec zahrnuje všechny členy přenosové cesty, které mají za úkol snímat, zesilovat, upravovat, zaznamenávat a nakonec reprodukovat zvuk. Od celého systému je vyžadována především co nejmenší odchylka výstupního signálu

(reprodukce) od vstupního signálu. Případné odchylky těchto signálů vznikají jak v samotném přenosovém řetězci, tak i mimo něj, například vlivem akustických vlastností okolního prostoru (dozvuk, odrazy). [1] Kvalitu celého systému udává kvalita jednotlivých částí elektroakustického řetězce, zejména pak nejslabšího článku.

Elektroakustický řetězec se obecně skládá z těchto 3 základních částí.

- Zdroj signálu (převodník akustického signálu na elektrický, výstup jiného zařízení, optický měnič apod.) Rozeznáváme nízko-úrovňové zdroje (od stovek  $\mu\text{V}$  po jednotky  $\text{mV}$ ), u kterých používáme pro další zpracování předzesilovače a vysokoúrovňové zdroje (od stovek  $\text{mV}$  do asi  $1,5\text{ V}$ ), jejichž výstupní signál již nemusíme zesilovat. Citlivost vysoko-úrovňových zdrojů je však oproti nízko-úrovňovým podstatně menší.
- Obvody pro zesílení a úpravu signálu
- Elektrické spotřebiče (elektroakustický měnič, měřící obvody, apod.)



**Obr.2.1** Blokové schéma elektroakustického řetězce se snímačem zvuku, předzesilovačem, dolní propustí, sloužící jako filtr vysokých frekvencí; vzorkovacími obvody, analogově digitálním převodníkem a zapisovačem na CD

Druh zdroje	Citlivost při 1kHz (u mikrofonů) nebo výstupní napětí na 1kHz (u ostatních zdrojů)	Max. výstupní napětí	Minimální výstupní impedance	Vstupní citlivost odpovídajícího zesilovače	Vstupní odpor odpovídajícího zesilovače
Mikrofon elektromagnetický	2 - 10 mV/Pa	50 mV	100 - 500mH	1mV	10 kOhm
Dynamický mikrofon 200 ohm	1 - 3 mV/Pa	25mV	200 ohm	0.5mV	10 kOhm

<b>Druh zdroje</b>	<b>Citlivost při 1kHz (u mikrofonů) nebo výstupní napětí na 1kHz (u ostatních zdrojů)</b>	<b>Max. výstupní napětí</b>	<b>Minimální výstupní impedance</b>	<b>Vstupní citlivost odpovídající ho zesilovače</b>	<b>Vstupní odpor odpovídajícího zesilovače</b>
Mikrofon dynamický stredo-ohmový	3 - 5mV/Pa	50mV	600 ohm - 5 kOhm	3 mV	1 kOhm
Mikrofon dynamický vysoko-ohmový	10 mV/Pa	100mV	47 kOhm	5mV	100 kOhm
Mikrofon páskový	0.1mV/Pa	10mV	200 ohm	0.3 mV	1 kOhm
Mikrofon elektretový	1 - 10 mV/Pa	100mV	600 ohm - 3 kOhm	0.5 - 5mV	4.7 - 15 kOhm
Studiový elektrostatický	8 - 25 mV/Pa	2.5V	150 ohm	10 mV	1 kOhm
Vf přijímač bezdrátového mikrofonu		10mV - 1.55V	150 ohm	250mV	1 kOhm
IR přijímač bezdrátového mikrofonu		0.5 - 1V	25 - 2000 ohm	250 mV	1 - 47 kOhm
Elektrodynamická přenoska(gramofon)	8 - 20 mV	30 - 60mV	10 ohm - 5 kOhm	5mV	47 - 100 kOhm
Magnetodynamická přenoska (gramo)	1 - 10 mV	3 - 30 mV	10 ohm - 5kOhm	5mV	47 - 100 kOhm
Krystalová přenoska (gramofon)	200 - 500 mV	1.5V	1 - 5 megaohm + 1 nanofarad	250 mV	>1 megaohm
Kazetový magnetofon		100 - 500 mV	1 - 47 kOhm	250 mV	10 - 100 kOhm
Cívkový magnetofon		755 mV - 2V	1 - 47 kOhm		10 - 100 kOhm
Studiový magnetofon		755 mV - 1.55 V	60 - 200 ohm	775 mV	60 - 200 ohm
Videorekordér, počítač (line-out), CD		0.755V	1 kOhm	0.775V	10 - 100 kOhm
Rozhlasový přijímač - diodový výstup		0.5 - 2 V	Méně nebo rovno 47 kOhm		100 kOhm
Tónový generátor		do 2V	600 ohm		1 - 100 kOhm
Aktivní směřovací pult		200-775 mV	1 kOhm	250 - 775 mV	10 - 100 kOhm

**Tab. 2.3** Přehled parametrů zdrojů nízkofrekvenčních signálů [11]



## 2.3 Elektroakustický měnič

Elektroakustický měnič je zařízení, které mění vstupní akustický signál na elektrický a obráceně prostřednictvím mechanických systémů. Pokud jde o změnu z akustického na elektrický signál, jedná se vzhledem k elektroakustickému řetězci o zdroj signálu (mikrofon), v opačném případě změny signálů mluvíme o vysílači (reproduktor).

Pro přeměnu mechanické energie zvukové vlny na elektrický signál se využívá několik různých principů, na které bude zaměřena další kapitola. Jde např. o elektromagnetický, magnetodynamický, elektrodynamický, elektrostatický, piezoelektrický.

### 3 MIKROFONY

Mikrofon je elektroakustický měnič, sloužící k přeměně akustické energie na elektrickou. Jako první člen elektroakustického řetězce má podstatný vliv na kvalitu signálu. [1]

#### 3.1 Princip přeměny akustického signálu na elektrický

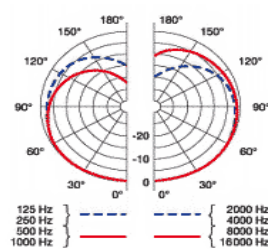
Téměř každý mikrofon obsahuje membránu, což je tenká vrstva (mechanický systém), pohybující se vlivem proměnlivého tlaku vyvolaného dopadající zvukovou vlnou. Pokud akustický tlak působí pouze na jednu stranu membrány, jedná se o tlakový mikrofon. Amplituda (nejvyšší výchylka) membrány v tomto případě nezávisí na vzdálenosti zdroje, ale pouze na akustickém tlaku. Jedná se tak o všesměrový mikrofon s kulovou směrovou charakteristikou.

Přivedeme-li akustický signál vhodným způsobem i na zadní stranu membrány, výchylka membrány již nebude záviset na akustickém tlaku, ale na rozdílu akustického tlaku před a za membránou. Se zvětšujícím se rozdílem (tlakovým spádem – tzv. gradientem) se výchylka membrány zvětšuje. V tomto případě mluvíme o mikrofonech gradientních.

U tohoto druhu mikrofону jsou výchylka membrány a tím i velikost výstupního napětí závislé na derivaci akustického tlaku podle směru šíření. Výstupní signál je tedy závislý na poloměru zakřivení akustické volnoplachy. Čím větší zakřivení, menší poloměr, čím bližší akustický zdroj, tím větší výstupní signál. Pro vzdálený zdroj, u kterého můžeme počítat s rovinnou vlnou (nekonečně velký poloměr zakřivení) je výstupní napětí nulové. Tyto mikrofony se používají především pro snímání akustického signálu ve studiích a pro přenos řeči z hlučného prostředí. [1]

#### 3.2 Směrové charakteristiky

Směrová charakteristika mikrofону je velmi důležitým parametrem, který bychom měli mít při výběru mikrofonu na paměti. Ukazuje nám, s jakou citlivostí mikrofon snímá zvuky přicházející v ose a mimo osu mikrofonu. Toto se zaznamenává do tzv. kruhového diagramu (polar pattern), který je u naprosté většiny výrobců k danému typu mikrofону k dispozici. V kruhovém diagramu bývá často zaznamenáno více směrových charakteristik (většinou jinou barvou) daného mikrofonu pro různé frekvence, viz obr 3.1. [8]



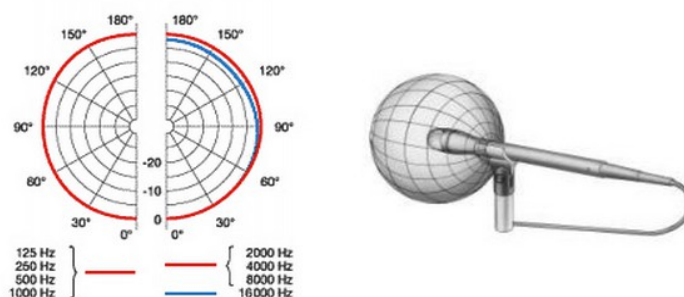
**Obr. 3.1.** Ukázka směrové charakteristiky s rozdělením pro jednotlivá frekvenční pásma

Směrová charakteristika mikrofonu je dána mechanickou konstrukcí vložky a pouzdra mikrofonu. Konstrukteři záměrně navrhují mikrofony s různými charakteristikami v závislosti na předpokládaném použití. Některé typy kondenzátorových mikrofonů (převážně studiové mikrofony) mohou mít směrovou charakteristiku přepínatelnou mezi několika typy, což velmi zvyšuje jejich možnost použití pro různé účely. [8]

### 3.2.1 Typy směrových charakteristik

#### a) Všesměrová neboli kulová charakteristika (omni-directional)

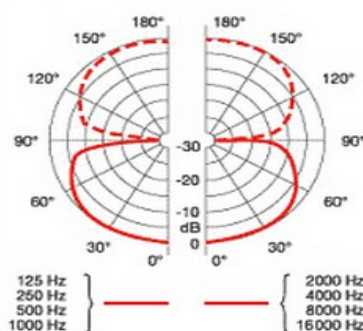
Mikrofon se všesměrovou neboli kulovou charakteristikou snímá zvuk přicházející mimo osu mikrofonu se stejnou citlivostí jako zvuk přicházející v ose mikrofonu. Mikrofony s kulovou charakteristikou mají jednoduchou konstrukci a mívají celou řadu výhod (Ale i nevýhod, například výrazně menší odolnost vůči zpětné vazbě než mikrofony s kardioidní či superkardioidní směrovou charakteristikou). Mezi největší výhody mikrofonů s touto směrovou charakteristikou patří to, že se u nich neuplatňuje narůstání basů se snižující se vzdáleností od mikrofonu – tzv. proximity efekt, dále jsou méně náchylné na manipulační hluky a často jsou schopné zpracovat i vyšší akustický tlak. [8]



**Obr. 3.2** Všesměrová neboli kulová charakteristika (omni-directional) se znázorněním frekvenčních pásem

### b) Osmičková charakteristika (bi-directional)

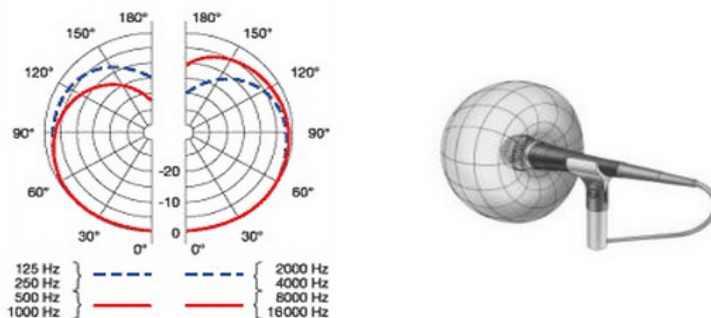
Mikrofon s osmičkovou neboli bidirekcionalní charakteristikou snímá s největší citlivostí zvuk přicházející v ose mikrofону at' už zepředu nebo zezadu. Zvuky přicházející ze stran jsou potlačovány. U mikrofónů s touto směrovou charakteristikou se uplatňuje efekt narůstání basů s přibližujícím se zdrojem zvuku k mikrofónu (tzv. proximity efekt). Mikrofony s osmičkovou charakteristikou se používají především při některých metodách stereofonního snímání zvuku a také v rozhlasových studiích pro snímání dvou proti sobě sedícím řečníkům. [8]



*Obr. 3.3 Osmičková charakteristika (bi-directional) se znázorněním frekvenčních pásem*

### c) Kardioidní neboli ledvinová charakteristika (cardioid)

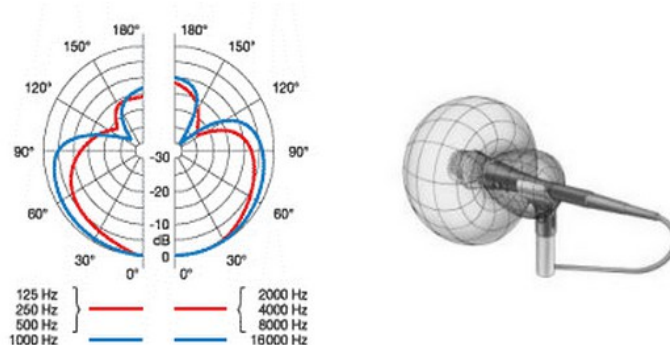
Mikrofony s kardioidní neboli ledvinovou charakteristikou jsou jedny z nejpoužívanějších mikrofónů v profesionální zvukové technice. Mikrofon s kardioidní směrovou charakteristikou snímá s největší citlivostí zvuk přicházející zepředu v ose mikrofónu a zvuk přicházející mimo osu mikrofónu je více či méně potlačen. Diagram má tvar srdce, proto se nazývá kardioidní směrová charakteristika. U těchto mikrofónů se též uplatňuje narůstání basů s přibližujícím se zdrojem signálu k mikrofónu (proximity efekt). Mikrofony s kardioidní směrovou charakteristikou jsou s výhodou používány při živém zvučení pro jejich vysokou odolnost vůči zpětné vazbě (feedback). [8]



*Obr. 3.4 Kardioidní neboli ledvinová charakteristika (cardioid) se znázorněním frekvenčních pásem*

#### d) Superkardioidní charakteristika (super-cardioid)

Superkardioidní směrová charakteristika je svými vlastnosti velmi podobná kardioidní směrové charakteristice. Mikrofony s touto směrovou charakteristikou jsou směrovější, to znamená, že je s největší citlivostí snímán zvuk přicházející zepředu v ose mikrofону a zvuk přicházející mimo osu mikrofónu je potlačen výrazněji než u mikrofónů s kardioidní směrovou charakteristikou. [8]



Obr. 3.5 Superkardioidní charakteristika (super-cardioid)

### 3.2.2 Srovnání vlastností jednotlivých směrových charakteristik

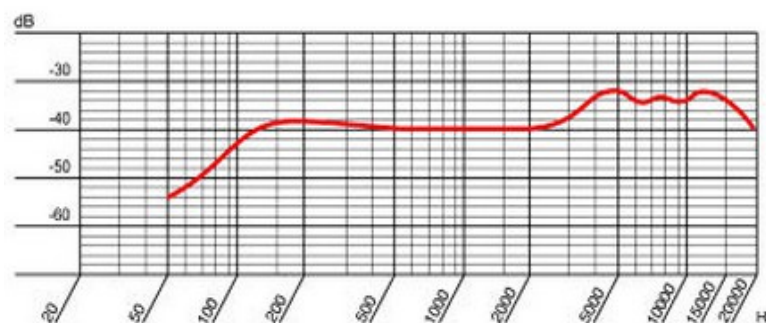
Směrová charakteristika	Kulová	Kardioidní	Super-kardioidní	Osmičková
Kruhový diagram				
Úhel pokrytí	360°	131°	115°	90°
Úhel nejmenší citlivosti	-	180°	126°	90°
Potlačení zvuku přicházejícího zezadu	0	25 dB	12 dB	0
Citlivost snímání zvuku okolí *	100%	33%	27%	33%
Vzdálenostní faktor *	1	1,7	1,9	1,7

Tab.3.1 Srovnání vlastností jednotlivých směrových charakteristik [8]

### 3.3 Frekvenční charakteristika

Frekvenční neboli kmitočtová charakteristika je závislost výstupního napětí mikrofónu na kmitočtu (při konstantním akustickém tlaku). Každá taková charakteristika by měla mít zvlnění v celém slyšitelném pásmu, což je asi 20Hz – 20kHz.

Je to velmi důležitý parametr každého mikrofónu, který jinými slovy znázorňuje citlivost mikrofónu pro zvuk přicházející zepředu v ose mikrofónu.



**Obr. 3.6** Frekvenční charakteristika mikrofону

Na obrázku 3.6 jsou na vodorovné ose grafu vyznačeny frekvence slyšitelného zvukového spektra a na svislé ose je vyznačena výstupní úroveň signálu v dB.

### 3.4 Elektrické charakteristiky mikrofónů

#### 3.4.1 Citlivost

Citlivost mikrofónu je poměr výstupního napětí mikrofónu a akustického tlaku, který toto napětí vybudil. Udává se ve V/Pa nebo v mV/Pa. Citlivost lze také vyjádřit jako poměrnou hodnotu v dB vztaženou k referenční úrovni 1 V/Pa. Citlivost mikrofónu je obecně frekvenčně závislá. [1]

$$dB = 20 \log \frac{\text{citlivost} [V/Pa]}{1}$$

U elektrodynamického mikrofónu používaného pro přenos lidské řeči se citlivost pohybuje asi kolem 2,5mV/Pa (-52dBV). Tento mikrofón je použitelný pouze pro malé vzdálenosti. Elektrostatický (kondenzátorový) ruční mikrofón s citlivostí 4mV/Pa (-48dBV) umožní snímání na větší vzdálenost než mikrofóny elektrodynamické. Pro různé případy použití a potřeby odběratelů se vyrábí mikrofóny s i výrazně vyšší citlivostí.

#### 3.4.2 Impedance

Elektrickou impedanci mikrofónu měříme na výstupních svorkách. Její velikost je důležité znát pro optimální přizpůsobení mikrofónu k zesilovači. Impedance je kmitočtově závislá a většinou se udává pro kmitočet 1 kHz. Vstupní impedance zesilovače by měla být 5-10krát větší než impedance mikrofónu. Zatížení mikrofónu s nízkou vstupní impedancí zesilovače, má za následek zkreslení kmitočtové charakteristiky, zvýšení zkreslení a snížení poměru signál šum. [1]

### 3.4.3 Šum

Šumové vlastnosti mikrofonu se vyjadřují odstupem šumového napětí. Je to poměr mezi výstupním napětím mikrofonu, které vyvolává referenční hladina zvuku 94dB (tomu odpovídá akustický tlak 1Pa), a šumovým napětím na výstupu mikrofonu při jeho umístění v dokonale tichém prostředí. Vlastní šum mikrofonu je způsoben elektrickými obvody (cívka, zesilovač, atd.) a tepelným pohybem molekul vzduchu, které narážejí na membránu. Například, u některých mikrofonů, se šum pohybuje kolem 15dB. Rozsah šumu zaleží na určitých typech mikrofonů a na jejich vlastním vnitřním složení. [4]

### 3.4.4 Odstup rušivých signálů

Odstup rušivých signálů je důležitý údaj při použití elektrodynamických mikrofonů, které jsou citlivé na magnetické pole. Narušení magnetického pole mikrofonu způsobuje tzv. brum, který výrazně snižuje kvalitu signálu. Tento problém u kvalitních mikrofonů řeší zabudovaná kompenzační cívka, která je připojena ke snímací cívkce s opačnou orientací, což působení vnějšího magnetického pole částečně vyruší.

## 3.5 Typy mikrofonů

Mikrofony dělíme dle více kritérií:

- dle typu akustického přijímače (tlakové, gradientní, vlnové)
- dle směrových charakteristik či druhu mechanického systému (membránové, bezmembránové)
- dle druhu elektromechanického děliče (reciproké měniče, nereciproké měniče)

Reciproké elektromechanické děliče využívají přímo fyzikální principy a jsou obousměrné. To znamená, že tentýž měnič může pracovat jako přijímač, nebo i jako vysílač. Nereciproké převodníky nevyužívají fyzikální principy, ale pouze vhodné vlastnosti. [1]

Mezi nereciproké převodníky patří např. uhlíkový mikrofon, který využívá závislosti velikosti elektrického odporu uhlového prachu a jeho stlačení.

Reciproké elektromechanické měniče rozdělujeme podle fyzikálního principu na:

- elektrodynamické

- elektromagnetické
- elektrostatické
- piezoelektrické
- magnetostrikční

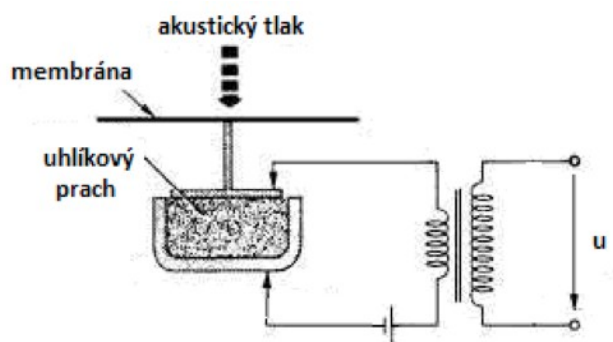
Dále tyto měniče dělíme na dvě skupiny

- rychlostní, kde je výstupní napětí úměrné rychlosti pohybu membrány (např. mikrofony elektromagnetické, elektrodynamické, magnetostrikční)
- výchylkové, kde je výstupní napětí úměrné výchylce membrány (např. mikrofony elektrostatické či piezoelektrické)

### 3.5.1 Uhlíkové mikrofony

Uhlíkové mikrofony patří mezi prakticky první používané mikrofony. Jsou složeny z uhlíkového prachu, umístěném v prostoru mezi dvěma elektrodami, přičemž jedna je pevná a druhá spojena s pohyblivou membránou. Při měnícím se přiváděném akustickém tlaku na membránu se mění odpor uhlíkového prachu mezi elektrodami. Membrána má kónický tvar, tvoří ji hliníková fólie v jejíž středu je opatřena pozlacenou elektrodou, zasahující do prachové komůrky.

Tyto mikrofony se vyrábí jako malé mikrofonní vložky pro telefonní přístroje. Jejich výroba je velmi jednoduchá a levná. Nevýhodou těchto mikrofonů je omezený kmitočtový rozsah (200-3400 Hz) a vysoká náchylnost na otřesy. [4]



*Obr. 3.7. Schéma a princip uhlíkového mikrofonu [4]*



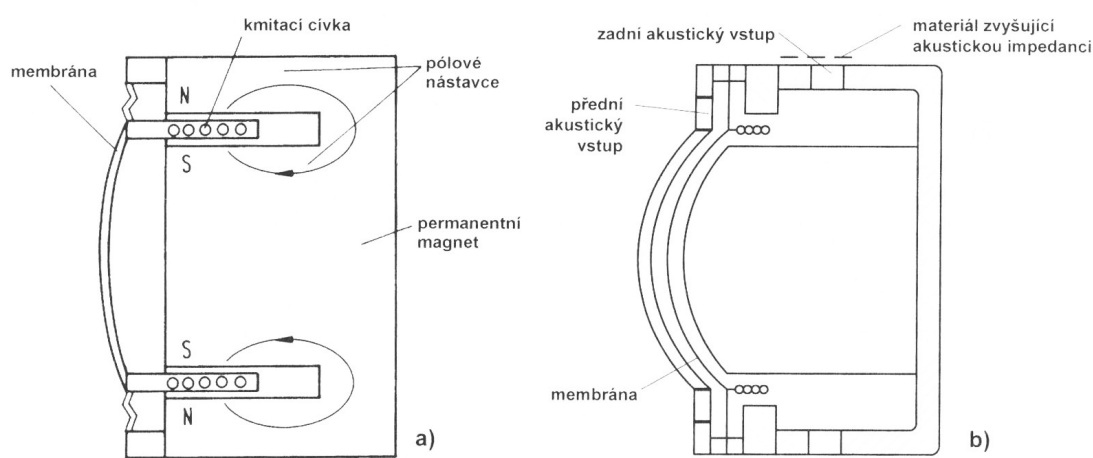
### 3.5.2 Elektrodynamické mikrofony

Elektrodynamické mikrofony patří mezi nejrozšířenější druh mikrofونů, který je mechanicky velmi odolný a snímá i velmi vysoké úrovně akustického tlaku. Jelikož tyto mikrofony neobsahují žádné elektronické obvody, nevyžadují tak ani žádné napájení.

Vstupní předzesilovač musí mít větší zesílení, protože jejich výstupní signál je velmi slabý. Často dochází také z důvodu zesílení vstupního předzesilovače k nárůstu šumu, což omezuje použití. Je využíván především k snímání zvuků s větší intenzitou z menších vzdáleností. [4]

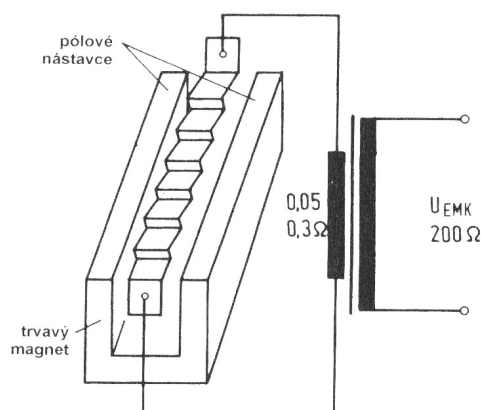
Tyto mikrofony se obecně vyznačují relativně širokým kmitočtovým rozsahem, malým zkreslením, nízkým šumem, což vše je vhodné především pro přenos řeči. Existují jak membránové, tak nemembránové dynamické mikrofony (páskové).

Membránové mikrofony mají membránu spojenou s kmitací cívkou, která se v rytmu změn akustického tlaku pohybuje v magnetickém poli permanentního magnetu, viz obr. 3.8a [1]



**Obr 3.8** a) Schéma uspořádání elektrodynamického mikrofону s membránou; b) Konstrukce gradientního elektrodynamického mikrofону [1]

Pohybem cívky v magnetickém poli permanentního magnetu se v ní indukuje napětí úměrné rychlosti změny akustického tlaku. U páskových elektrodynamických mikrofонů je membrána s cívkou nahrazena příčně zvlněnou hliníkovou fólií ve tvaru pásky. Pásek, který je umístěn v magnetickém poli, je rozechvíván změnami akustického tlaku a přímo se v něm indukuje nízkofrekvenční elektrický signál, viz obr 3.9. [1]



**Obr. 3.9** Principiální schéma uspořádání páskového mikrofonu

Elektrodynamické mikrofony může dále dělit na tlakové a gradientní. Zachován je snímací prvek, mění se pouze mechanická konstrukce. U gradientových se přivádí akustický tlak jak na přední, tak i na zadní stranu membrány, či pásky.

Hmotnosti i velikost membrány výrazně ovlivňuje charakteristiky celého mikrofonního systému. Se zvětšující se velikostí membrány má mikron menší hodnoty šumu, ale tím je i vyšší setrvačnost membrány z důvodu hmotnosti, následkem které dochází k omezení frekvenční charakteristiky v oblasti vyšších kmitočtů. Další problém, který velká membrána obnáší je příjem zvuku přicházející mimo osu mikrofonu. Takové vlnění dorazí na jednu stranu membrány dříve než na druhou, čehož následkem je kombinace některých vyšších frekvencí mimo fázi a s tím i zhoršená kvalita vyšších tónů. Naopak hluboké frekvence jsou snímány velmi dobře díky nižší rezonanční frekvenci membrány.

Dynamické mikrofony jsou nízko-impedanční se jmenovitou impedancí  $200\ \Omega$ . Jejich citlivost bývá kolem  $1,5\ \text{mV/Pa}$ . Kvalitní výrobky uspokojivě přenášejí signály v rozsahu  $30\ \text{Hz} - 15\ \text{kHz}$ , při zkreslení menším než  $0,5\%$ . [1]

### 3.5.3 Elektromagnetické mikrofony

Elektromagnetické mikrofony pracují na stejném principu jako elektrodynamické mikrofony s tím rozdílem, že snímací cívka je pevně ukotvena k tělu a není spojena s membránou. Pohyb tzv. chvějky spojené s membránou, popřípadě celé membrány, mění magnetický tok cívkou a tím v ní indukuje nízkofrekvenční signál. [1]

Tyto mikrofony jsou díky malým rozměrům a nízké ceně jsou velice rozšířené. Jsou však omezeny relativně malým kmitočtovým rozsahem a jsou tak vhodné především pro snímání lidské řeči.

### 3.5.4 Elektrostatické mikrofony

Elektrostatické mikrofony, které jsou často nazývány nesprávně kondenzátorové, se skládají ze dvou od sebe vzájemně izolovaných elektrod. Před pevnou elektrodou je v malé vzdálenosti (20–30  $\mu\text{m}$ ) umístěna membrána z kovové nebo metalizované fólie. Na takto vzniklý kondenzátor o kapacitě 30–100 pF je připojeno stejnosměrné polarizované napětí o velikosti 30–200 V. Velikost kapacity takto vzniklého kondenzátoru můžeme určit z rovnice: [1]

$$C = \varepsilon \cdot S / d \quad [\text{F}]$$

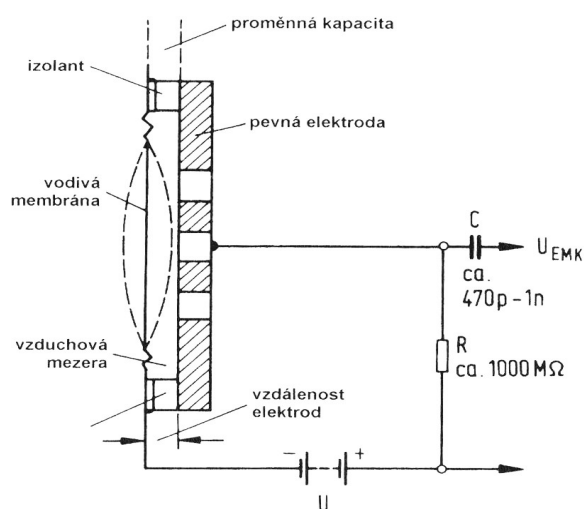
kde  $\varepsilon$  je permitivita vzduchu,  $S$  je plocha elektrod a  $d$  jejich vzdálenost. Náboj tohoto kondenzátoru je:

$$Q = C \cdot U \quad [\text{C}]$$

kde  $U$  je polarizační napětí. Změny akustického tlaku rozechvějí membránu, mění se vzdálenost  $d$  a tím i kapacita kondenzátoru. Zajistíme-li, aby se náboj při změně kapacity kondenzátoru nemohl rychle vyrovnat, potom z druhé rovnice vyplývá, že při zmenšení kapacity kondenzátoru (zvětšení vzdálenosti membrány od pevné elektrody) se musí zvětšit napětí kondenzátoru ( $Q$  uvažujeme konstantní). Požadavek pomalého vyrovnání náboje při změně kapacity zajistíme rezistorem  $R$ , který zvýší vnitřní odpor zdroje polarizovaného napětí. Jeho velikost volíme s ohledem na nejnižší požadovaný přenášený kmitočet takto:

$$R \geq 1 / 2\pi f_d C \quad [\Omega]$$

kde  $f_d$  je nejnižší přenášený kmitočet. [1]



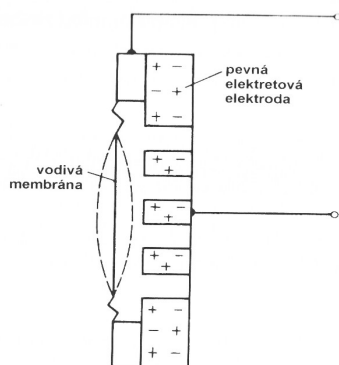
**Obr. 3.10** Schéma zapojení elektrostatického mikrofonu

Mikrofon snímá pouze při přivedení tzv. Phantomového napájení, které nám zaručuje přítomnost elektrického náboje na deskách. Za použití tranzistorů FET nebo elektronek v předzesilovači (vysoká vstupní impedance) se zamezuje oslabování náboje na deskách.

Složitější konstrukce těchto typů mikrofonů se promítá v jejich vyšší ceně. Ze všech klasických mikrofonních systémů jsou nejcitlivější a za předpokladu kvalitního předzesilovače mají velmi nízký šum. Jejich kmitočtová charakteristika je vyrovnaná a překračuje hranice lidského sluchu. Jsou náchylné na vlhkost. [4]

### 3.5.5 Elektrové mikrofony

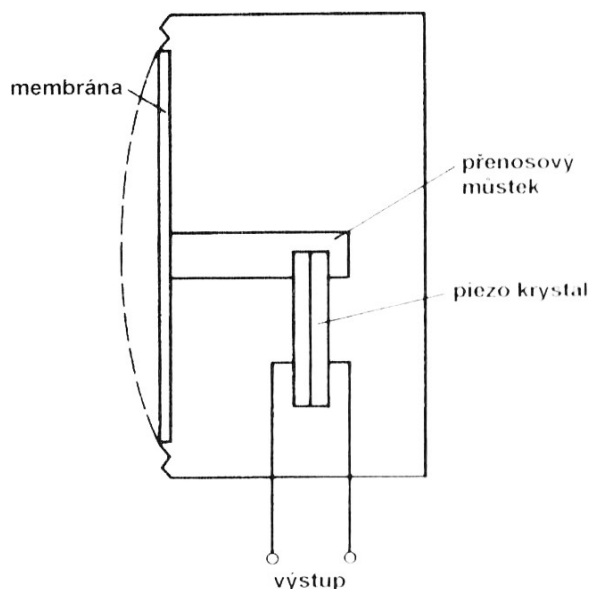
Elektrové mikrofony se řadí do skupiny elektrostatických mikrofonů s rozdílem toho, že u těchto mikrofonů není náboj přiváděn na membránu z napájecího zdroje, ale je její součástí. Tyto membrány jsou charakterizovány velmi dobrými izolačními vlastnostmi a časovou stálostí. Součástí elektrové kapsle bývá předzesilovač napájený z externího zdroje. Např. baterie.



**Obr. 3.11** Princip elektrového mikrofonu s pevnou elektrovou elektrodou [4]

### 3.5.6 Piezoelektrické – krystalové mikrofony

Tyto mikrofony, které se často nazývají též krystalové, využívají piezoelektrického jevu. U některých látek (krystaly, keramické materiály, plastické hmoty) vzniká při mechanickém namáhání tlakem nebo ohybem elektrický náboj, který se snímá elektrodami. Piezoelektrické mikrofony mají poměrně velkou impedanci (vnitřní kapacita kolem jednoho nF) a citlivost 1-3 mV/Pa. [1]



**Obr. 3.12** Schéma piezoelektrického mikrofону

### 3.6 Speciální mikrofony

Existuje velká poptávka po mikrofonech v provedení odpovídající přesně požadavkům a účelům použití. Jde např. o modulové mikrofonní systémy, mikrofony s měřicí sondou, soupravy poslech - řeč či bezdrátové mikrofony.

Modulové mikrofonní systémy jsou takové systémy, kdy můžeme vyměňovat mikrofonní vložku a tak jej vždy přizpůsobit konkrétním požadavkům.

Mikrofony s měřicí sondou mají tvar podlouhlé sondy o malém průměru, což dovoluje měření zvuku v těžko přístupných místech.

Soupravy poslech – řeč mají v dnešní době široké využití např. v informačních, dispečinkových, reportážních službách. Všude tam kde je vhodná kombinace mikrofону s náhlavními sluchátky. Od těchto souprav vyžadujeme především dobrou srozumitelnost řeči i v hlučném prostředí, malou hmotnost a ergonomické řešení. Pro tyto účely se dobře hodí použití dynamických sluchátek spolu s elektrovým mikrofonom.



**Obr. 3.13** Souprava HME 15-KA (Sennheiser electronic)

Na obrázku 3.13 je souprava určená pro použití na malých letadlech. Tato souprava je vybavena uzavřenými dynamickými sluchátky (rozsah 30 Hz-16 kHz, jmenovitá impedance  $600\ \Omega - 2 \times 1\ 200\ \Omega$ , citlivost 100 dB/1 kHz) a elektrovým mikrofonem s předzesilovačem omezujícím šum (rozsah 200Hz-8 kHz, výstupní impedance  $470\ \Omega$ , napájecí napětí 4-28 V, výstupní napětí 170mV/114 dB). Hmotnost bez kabelu je asi 140 g. [1]

### 3.7 Bezdrátové mikrofony

Hlavní výhoda bezdrátových mikrofonů spočívá v možnosti volného pohybu a úspoře instalačních materiálů. Přenos signálu je zabezpečen radiovými vlnami či infračerveným zářením. Všechny mikrofony využívající radiový přenos musí být schváleny telekomunikačním úřadem.

Moderní bezdrátové mikrofony jsou jak po stránce snímání kvality tak přenosu signálu na dálku srovnatelné s kabelovými verzemi, popř. je-li signál přímo v mikrofonu digitalizován, ztráta kvality na vedení odpadá. Většina těchto mikrofonů také umožňuje změnu přenosového kmitočtu (vhodné pro použití více mikrofonů). Součástí mikrofonu musí být také vlastní zdroj, který napájí jak snímací část mikrofonu, tak bezdrátový vysílač.

Vysílač těchto mikrofonů může být buďto zabudován přímo do pouzdra mikrofonu, nebo s mikrofonem spojen krátkým kabelem (kapesní vysílač). Na obr. 4.1 je znázorněno blokové schéma bezdrátového mikrofonu. Slabý signál z mikrofonu je zesílen mikrofonním předzesilovačem s nastavitelným zesílením. Dále zapojený omezovač amplitudy, zajišťuje, aby nenastalo zkreslení signálu přemodulováním. Místo omezovače amplitudy mají dražší mikrofony kompresor dynamiky, který ve spojení s expanderem v přijímači tvoří tzv. kompander dovolující účinně potlačit šum. [1] Kompander se používá jak k redukci šumu signálu bezdrátových mikrofonů, tak u záznamových zařízení, např. magnetofonů. Vstupní signál je za pomoci kompresoru dynamiky převeden na nižší dynamický rozsah a je tak přenášen (či zaznamenáván) signál o poměrně vysoké úrovni [1], což zamezuje přenosu nechtěného šumu. V přijímači, resp. při reprodukci s expanderem dynamický rozsah rozšíří opět na původní hodnotu. Tím se výrazně sníží příspěvek šumu od přenosové cesty, případně záznamového média. [1]

## 4 MĚŘENÍ FREKVENCE

Frekvenci  $f$  definujeme jako počet opakování periodického děje za jednotku času – jednu sekundu a její převrácenou hodnotou nazýváme periodu  $T$ .

Jedna sekunda patří mezi základní jednotky soustavy SI a je definována takto:

Jedna sekunda je doba trvání 9 192 631 770 period zadržení vznikajícího při přechodu elektronu mezi dvěma velmi blízkými hladinami základního stavu atomu cesia 133. [9]

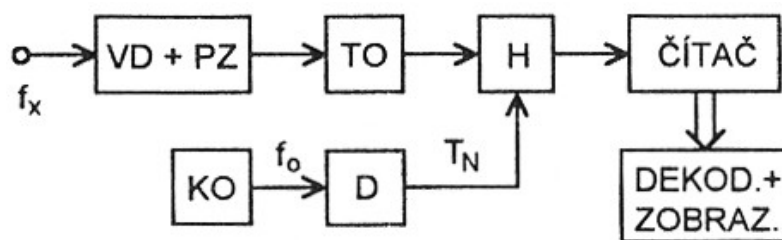
Běžně používané přesné zdroje definované frekvence je termostatový krystalem řízený oscilátor pracují od stovek kHz až jednotek MHz. Jejich dlouhodobá výdrž je obvykle v rozmezí  $10^{-6}$ /rok až  $10^{-9}$ /rok. [9]

### 4.1 Číslicové měření frekvence

#### 4.1.1 Přímé měření frekvence

Pro tento druh měření frekvence se nejčastěji používají čítače. Na obr. 4.1 je schéma průběhu signálu až k zobrazovací jednotce. Vstupní signál je veden vstupním děličem případně předzesilovačem (VD + PZ) a dále tvarován ve tvarovacím obvodu (TO) na pulsy definované úrovně. Pulsy jsou čítačem impulzů čítány vždy v době otevření hradla (H). Nastavíme-li otevírání hradla vždy po 1s, počet naměřených impulzů  $N$  pak odpovídá přímo frekvenci  $f_x$  v Hz.

$$f_x = N / T_0 \quad [\text{Hz}]$$



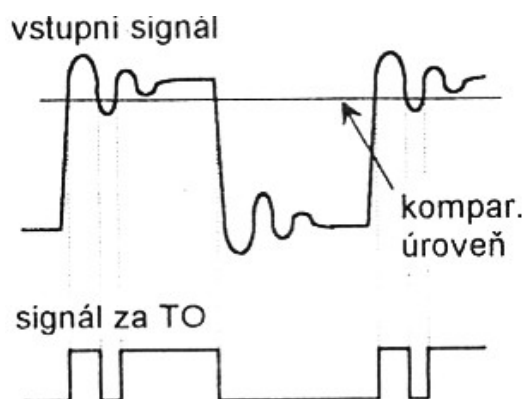
Obr. 4.1 Schéma přímého měření frekvence

$T_0$  je doba trvání impulsu, kdy je hradlo  $H$  otevřené. Frekvenci těchto impulzů  $f_0$  určuje krystalem řízený oscilátor (KO) po vyladění číslicovým děličem (D). Zavádíme tak tzv. dělicí konstantu, kterou nastavujeme tak, aby délka trvání impulsu  $T_0$  byla dekadickým násobkem či podílem 1s.

Přesnost měření je zejména v oblasti nižších kmitočtů omezena rozlišovací schopností čítače  $\Delta'_{fx} = 1/T_o$ . Celková relativní chyba měření frekvence v procentech je pak dána vztahem [9]

$$\delta_{fx} \leq \left( 100 \frac{\Delta'_{fx}}{f_x} + \delta_{fo} \right) = \left( \frac{100}{f_x T_o} + \delta_{fo} \right) \quad [\%]$$

, kde  $\delta_f$  je chyba krystalem řízeného oscilátoru v %. Tímto způsobem lze měřit frekvenci radově do jednotek GHz.



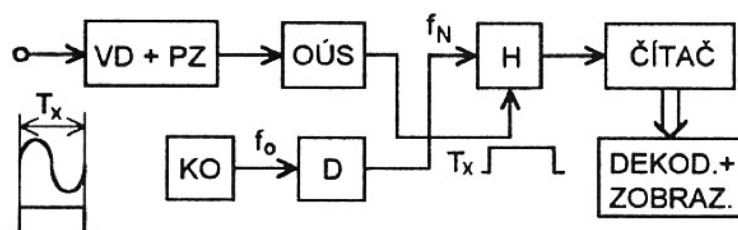
**Obr. 4.2** Porovnání průběhu signálu před a za tvarovacím obvodem vstupního signálu [9]

#### 4.1.2 Měření časového intervalu

Jedná se o podobné schéma zapojení jako u metody přímého měření frekvence. Zde jsou však vstupy do hradla (H) zaměněny. Nabízí se tím možnosti změny režimu měření od měření doby periody, délky impulsu či doby mezi dvěma pulsy. V obvodu úpravy signálu (OÚS) se převádí měřený časový interval na délku impulsu definované frekvence  $f_N$  získané vydělením frekvence  $f_o$  oscilátoru. Pro měřený časový interval  $T_x$  pak platí:

$$T_x = N / f_N \quad [s]$$

, kde N je počet impulsů načtený čítačem. Schéma takového měřicího obvodu je znázorněno na obr. 4.3.



**Obr. 4.3** Blokové schéma zapojení obvodu pro měření časového intervalu [9]



Oproti přímému měření frekvence se v celkové chybě měření uplatní navíc chyba  $\delta_K$  vznikající při převodu měřeného časového intervalu na délku pulsu, který otevírá hradlo (viz obr. 4.3). Tato chyba vzniká zejména díky šumu superponovanému k měřenému signálu a kolísání komparační úrovně. Celková chyba měření časového intervalu je pak dána vztahem [9]

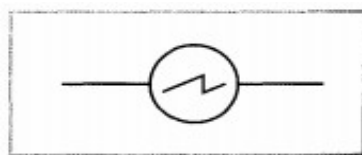
$$\delta_{Tx} = \left( \frac{100}{f_N T_x} + \delta_{f_0} + \delta_K \right)$$

## 4.2 Měření frekvence pomocí osciloskopu

Mezi další metody měření frekvence osciloskopem. U většiny laboratorních osciloskopů je definována převrácená hodnota rychlosti běhu časové základny v časových jednotkách na dílek rastru, takže z horizontální vzdálenosti dvou bodů zobrazeného průběhu lze vypočítat jejich časový rozdíl [9]. Osciloskopy vybavené kurzory umožňují přímo odečítat rozdíl jejich poloh v nastavitelných časových jednotkách, čímž získáme údaj periody průběhu  $T$ , jejíž převrácenou hodnotou je frekvence.

Osciloskop obecně řečeno slouží k zobrazování časových průběhů napětíových elektrických, především periodických signálů.

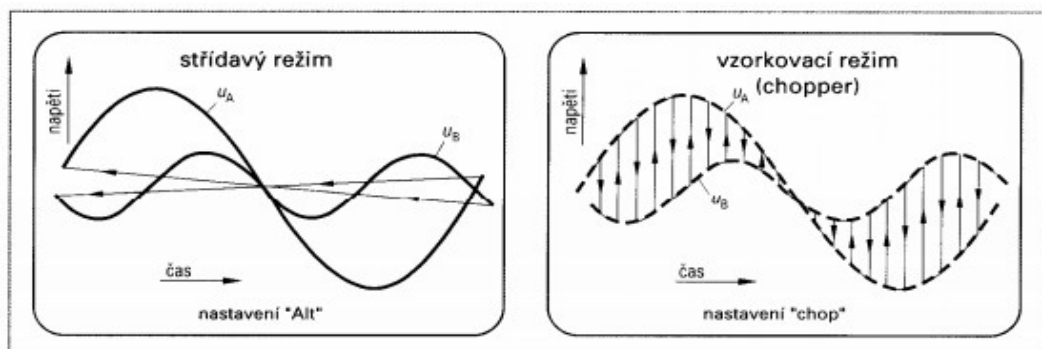
Elektronový paprsek je v Braunově elektronce (obrazovce) vychylován dvěma soustavami desek elektrostatického vychylování. Sledovaná vstupní napětí jsou zesilována tak, že osciloskopy mají rozlišení až 0,1 mV. [10]



**Obr. 4.4** Schématická značka osciloskopu

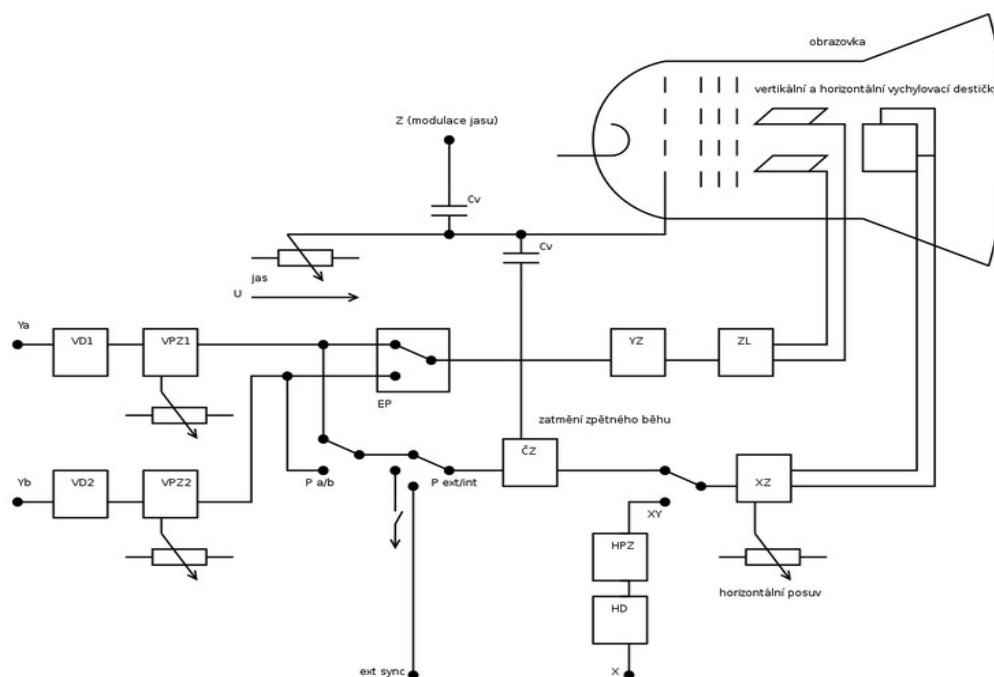
Osciloskop se skládá z těchto 4 hlavních částí:

- obrazovka
- vertikální zesilovač (vstupního signálu), Y-zesilovač,
- časová základna (generátor pilových kmitů pro horizontální vychylování), X-zesilovač,
- síťový zdroj včetně zdroje vysokého napětí pro obrazovku.



**Obr. 4.5** Ukázky režimů dvoukanálového osciloskopu

Při měření osciloskopem, nesmíme zapomenout, že měří napětí vždy jen proti zemi. Osciloskop může měřit jenom napětí. Všechny měřené zobrazované veličiny jsou proto pro účely měření převáděny na odpovídající napětí. Osciloskopem lze měřit okamžitou hodnotu (např. špičku) střídavého signálu, což je rozdíl nejvyšší a nejnižší výchylky stopy paprsku na stínítku obrazovky násobený nastaveným měřítkem ve V/cm. [10]



**Obr. 4.6** Blokové schéma klasického osciloskopu [12]

- Vstupy:
  - YA, YB - vstupní vertikální kanály
  - X - horizontální rozmítání v režimu Xz
- Z - modulace jasu
- VD1,2 - vstupní dělič
- VPZ1,2 - vstupní předzesilovač s ovládáním vertikální pozice zobrazeného signálu
- EP - elektronický přepínač pro zobrazení dvou průběhů současně
- YZ - koncový vertikální zesilovač pro zobrazení na obrazovce

- ZL - zpožďovací linka
- ČZ - časová základna
- Pext/int - výběr synchronizace časové základny
- HD - horizontální dělič
- HPZ - horizontální předzesilovač
- XY - přepínání signálu na horizontální destičky: časová základna nebo vstup X
- XZ - koncový horizontální zesilovač pro zobrazení na obrazovce s ovládáním posuvu

[12]

### 4.3 Měření nízkých frekvencí pomocí sondy

Na dnešním trhu se běžně vyskytují sondy pro měření nízkých frekvencí. Jejich standardní konfigurace poskytuje širokou frekvenční odezvu 30 - 2000 Hz se stabilním snímáním během sondování pole. Sondy jsou nastaveny tak, aby splňovaly normou definované požadavky pro měření frekvencí. Příklad takovéto sondy je na obrázku 4.7. Většina takových sond obsahuje možnosti nastavení snímaného frekvenčního pásma.

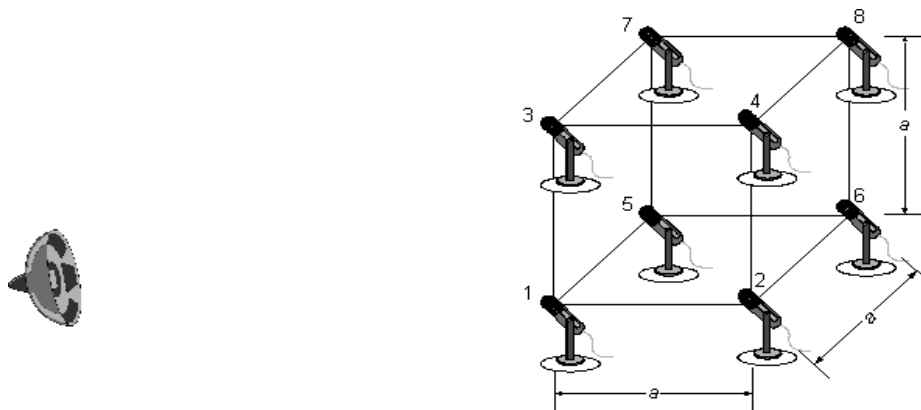


*Obr. 4.7 Sonda HI-3624A pro měření nízkých frekvencí*

## 5 LOKALIZACE ZDROJE NÍZKOFREKVENČNÍHO SIGNÁLU V 3D PROSTORU

V této části práce bych rád představil a detailněji analyzoval možnost lokalizace zdroje nízkofrekvenčního vlnění v trojrozměrném prostoru pomocí pole mikrofونů. Vycházet budu z názorného rozebrání problematiky ve zdroji č. 2.

Lokalizace zdroje nízkofrekvenčního vlnění znamená zjištění úhlu azimutů a elevace příchozího vlnění. (Definice těchto pojmů se nachází v kapitole 5.2) Dále je zde odvozen postup určení těchto úhlů v 3D prostoru za použití mikrofونového pole složeného z osmi všesměrových elektrostatických mikrofонů. Zpracovávat signál budeme metodou časových zpoždění, viz kapitola 5.1



**Obr. 5.1** Schéma experimentálního mikrofونového pole [2]

Mikrofونová pole pro snímání akustických signálů obecně využíváme ke zkoumání charakteristik zdrojů vlnění ať už v rovině či prostoru, zjištění spektrálních vlastností vlnění, jež zdroj vyzařuje, zjištění charakteru zdroje, nebo ve spojení s zobrazovací jednotkou k vizualizaci výsledovaných charakteristik zdroje vlnění. Akustický signál současně snímá několik mikrofонů. Signál z mikrofонů je následně digitalizován pomocí A/D převodníků. Datový tok ze všech mikrofонů musí být paralelní bez časových zpoždění výstupu jednotlivých měřených signálů.

Metod odhadu směru příchodu vlnění (**DOA**, z *angl. Direction of Arrival*) existují v zásadě tři skupiny: metody založené na časových zpožděních, metody založené na tvarování přijímací charakteristiky (tzv. beamforming) a metody založené na spektrálních odhadech vysokého rozlišení. [2]

Dále se budu zabývat už jen algoritmy založenými na metodě měření časových zpoždění. Experimentální pokus měření akustického signálu pomocí pole 8 mikrofонů

realizoval a ve své práci popsal Ing. Václav Eksler, z jejichž závěrů budu při vlastím návrhu řešení při použití na bezpilotních letounech vycházet.



*Obr. 5.2 Navržené experimentální mikrofonové pole a záznamové zařízení [2]*

## 5.1 Metoda časových zpoždění

Algoritmy této metody využívají snímání posloupnosti vzorků několika signálů ze snímačů, kdy je snímána a zaznamenávána daná sekvence vzorků, která se dále zpracovává. Z důvodu jednoduchosti a výpočetní nenáročnosti této metody jsou tyto algoritmy velmi často využívány právě k měření charakteristik akustických signálů. Tato metoda odhadu DOA má dvě části:

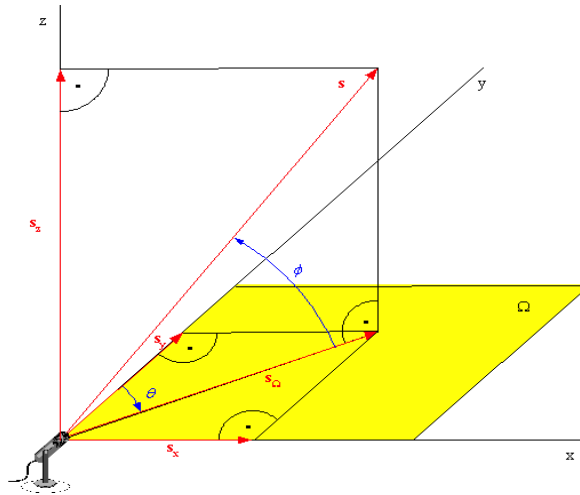
- **určení časových zpoždění** mezi dvojicemi senzorů - ta určíme např. pomocí vzájemné korelační funkce. Problematice měření frekvencí, času a fázových rozdílů se věnuje kapitola 4.
- při znalosti geometrie senzorového pole pak pomocí kombinace časových zpoždění **lokalizaci zdroje/zdrojů vlnění** [2]

Určení časových zpoždění mezi signály z jakékoliv dvojice mikrofonů může být provedeno z výpočtu vzájemné korelační funkce dvou signálů. Zpoždění, ve kterém se ve funkci vzájemné korelace vyskytne extrém, pak určuje časové zpoždění signálu

mezi dvěma senzory. [2] Tuto metodu značíme z angličtiny zkratkou GCC-PHAT (Generalized Cross Correlation - Phase Transform)

## 5.2 Formulace problému v trojrozměrném prostoru

Při odhadu směru příchodu vlnění (DOA) se snažíme zjistit hodnoty dvou základních parametrů a to azimutu  $\theta$  a elevace  $\varphi$ , viz obr. 5.3.



**Obr. 5.3** Znáznornění vektoru signálu  $s$  dopadajícího z libovolného směru v 3-D prostoru na referenční mikrofon, jeho azimutu  $\theta$  a elevace  $\varphi$  [2]

**Elevací**  $\varphi$  rozumíme úhel mezi vektorem  $s$  a rovinou  $\Omega$  (rovinou os  $x$ - $y$ ) měřený od roviny  $\Omega$  směrem ke kladné části osy  $z$ . Elevace  $\varphi$  tak může nabývat hodnot mezi  $-90^\circ$  a  $90^\circ$ .

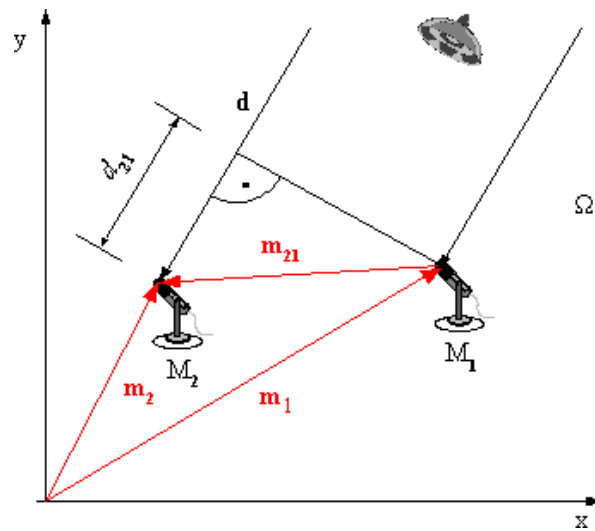
**Azimut**  $\theta$  je definován jako úhel mezi osou  $y$  a projekcí vektoru  $s$  do roviny  $\Omega$  měřený od kladné části osy  $y$  směrem ke kladné části osy  $x$ . Azimut  $\theta$  může nabývat hodnot mezi  $0^\circ$  a  $360^\circ$  [2]

Vektor  $s$  je jednotkový vektor orientovaný směrem ke zdroji vlnění je hledanou hodnotou a může být matematicky vyjádřen členy obsahujícími informaci o azimutu a elevaci. Tento vektor reprezentující směr DOA můžeme zapsat jako:

$$-[\cos \phi \sin \theta, \cos \phi \cos \theta, \sin \phi]^T \quad [2]$$

### Odvození vztahu mezi DOA a časovým zpožděním

Předpokládejme dvojici senzorů z obr. 5.4. Jednotkový vektor  $d$  označuje DOA. Vzdálenost navíc, kterou musí urazit signál k senzoru  $m_2$  vzhledem k senzoru  $m_1$ , je označena  $d_{21}$ . [2]



**Obr. 5.4** Rozdíl vzdáleností signálu dopadajícího na dvojici senzorů. [2]

Právě tento rozdíl vzdáleností způsobuje časové zpoždění signálu dopadajícího na senzory  $m_1$ ,  $m_2$ . Jak je zřejmé z obr. 6.4, rozdíl vzdáleností je skutečně projekcí vektoru spojujícího oba senzory do směru DOA. Dostáváme tedy vztah [2]

$$d_{21} = (\mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1)^T \mathbf{d} \quad (1)$$

Časové zpoždění mezi dopadem signálu na senzory  $m_1$  a  $m_2$  je pak dáno

$$t_{21} = \left( \frac{1}{v} \right) [(\mathbf{m}_2 - \mathbf{m}_1)^T \mathbf{d}] \quad (2)$$

kde  $v$  je rychlost šíření signálu.

## 6 NÁVRH A VÝBĚR SNÍMAČŮ

### 6.1 Kritéria pro výběr snímačů při různých použitíh na bezpilotních letounech

V této kapitole bych rád uvedl přehled kritérií pro výběr nízkofrekvenčních snímačů při použitíh na bezpilotních letounech pro dané účely. Pro výběr vhodných snímačů nás budou zajímat především jejich charakteristiky. U jednotlivých typů mikrofónů detailně popisují charakteristiky v kapitole 3. Zásadní pro nás bude výběr dle směrových, frekvenčních, elektrických a konstrukčních charakteristik.

V potaz musíme taktéž brát faktory ovlivňující životnost a spolehlivost daných snímačů. Jejich správnou funkci je zapotřebí zajistit i optimalizací umístění snímačů na letounu v závislosti na daném případě použitíh.

Krátce bych zmínil i ekonomická kritéria při pořizování takových snímačů.

V neposlední řadě nás bude také zajímat kompatibilita výstupů snímačů se systémy pro následné zpracování snímaných signálů.

Na základě všech těchto kritérií uvedených v této kapitole budu následně vybírat konkrétní snímače pro vybrané použitíh a navrhovat jejich způsob optimálního použitíh.

#### 6.1.1 Směrové charakteristiky

Výběrem vhodné směrové charakteristiky jednoho, či více snímačů na letounu, zajistíme omezení rušivých prvků v snímaném signálu. Jedná se především o hluk způsobený pohybem mechanických částí bezpilotního letounu, hluk způsobený nárazy větru a prouděním vzduchu kolem letounu a snímačů. Při výběru musíme brát také v potaz vlastnosti a změnu směrové charakteristiky pro dané frekvenční pásmo, které chceme snímat.

Budeme-li používat jeden snímač a nebude-li nás zajímat směr příchozího vlnění, použijeme snímače s široce směrovou charakteristikou (všesměrovou, popř. ledvinovou). Tím umožníme snímání signálu z větší části okolí, popř. pouze vymezenou výseč.

Použijeme-li však jeden snímač s úzce směrovou charakteristikou, můžeme mechanickým pohybem samotného snímače či optimalizací letu letounu získat informaci o směru příchozího vlnění a s navigačními informacemi také dopočítat polohu zdroje akustického signálu.



Pro efektivní zjištění polohy zdroje nízkofrekvenčního vlnění je, jak už bylo výše zmíněno, pole několika snímačů. Pro tyto účely je možné využití všech druhů charakteristik (všesměrové, osmičkové, ledvinové), dle toho jak širokou oblast chceme monitorovat.

### **6.1.2 Frekvenční rozsah**

Tento parametr nás informuje o šířce spektra frekvencí, které jsme schopni daným snímačem snímat a který jinými slovy znázorňuje citlivost mikrofonu pro zvuk přicházející zepředu v ose mikrofonu. Pro využití na bezpilotním letounu by měl být tento parametr co nejširší, abychom měli k dispozici informace o celém slyšitelném pásmu, což je asi 20Hz – 20kHz. Běžně se vyrábí snímače, které tento rozsah oproti slyšitelnému pásmu ještě rozšiřují. Budeme-li chtít z celkového frekvenčního rozsahu vybrat pouze určité frekvence, možností je výběr snímačů s požadovaným frekvenčním rozsah, nebo následná filtrace požadovaných frekvencí dalším prvkem (dolní, horní propust).

### **6.1.3 Elektrické charakteristiky**

Elektrickými charakteristikami u nízkofrekvenčních snímačů myslíme především jejich citlivost, impedanci, vstupní napětí, šum a odstup rušivých signálů.

Požadovaná citlivost snímače je závislá na rozsahu použití. Pro snímání pozemních zdrojů z bezpilotních letounů se bude požadovaná citlivost pohybovat řádově v desítkách mV/Pa. Kvalitní snímače pro toto použití nabízejí dnes již citlivost okolo 55 mV/Pa.

Při použití na blízkou vzdálenost, popř. chceme-li snímat pouze hlasité zdroje vlnění, bude postačovat jeden, či více snímačů s menší citlivostí.

Velikost impedance je důležité znát pro optimální přizpůsobení mikrofonu k zesilovači. Impedance je kmitočtově závislá a většinou se udává pro kmitočet 1 kHz. Vstupní impedance zesilovače by měla být 5-10krát větší než impedance mikrofonu. Zatížení mikrofonu příliš nízkou vstupní impedancí zesilovače, má za následek zkreslení kmitočtové charakteristiky, zvýšení zkreslení a snížení poměru signál šum.

Zajímat nás bude také vlastní šum mikrofonu, který způsobený elektrickými obvody (cívka, zesilovač, atd.) a tepelným pohybem molekul vzduchu, které narážejí na membránu. Například u některých mikrofonů se šum pohybuje kolem 15dB. Záleží to

především na typu snímače a na jeho vlastním vnitřním složení. Tento parametr pro použití na bezpilotních letounech a i obecně vyžaduje co nejmenší – řádově 1–3 dB.

Použijeme-li elektrodynamické snímače citlivé na magnetické pole, k dispozici máme také informaci o odstupu rušivých signálů, způsobený narušením magnetického pole snímače. Tato hodnota je již u moderních snímačů minimální a proto ji během měření nemusíme brát v potaz.

#### **6.1.4 Konstrukce a hmotnost**

Použití nízkofrekvenčních snímačů na bezpilotních letounech je oproti běžným mnohem specifičtější a je nutné klást důraz na optimalizaci konstrukce samotných snímačů a jejich hmotnosti.

Především je nutné zvažovat:

- ovlivnění aerodynamických vlastností letounu
- omezení a důsledky vibrací přenášených letounem k snímači
- ovlivnění vyvážení letounu způsobené nerovnoměrným rozložením snímačů
- možnosti konstrukčního připojení k letounu
- možnosti připojení na další systémy a napájení v letounu
- možnost připojení protivětrného krytu

#### **6.1.5 Množství a cena**

Při výběru vhodných snímačů musíme brát v potaz také jejich pořizovací náklady. To především při použití pole více nízkofrekvenčních snímačů, kde se mohou náklady na takové systémy vyšplhat na desetitisíce korun. Na trhu se již objevují konstrukční řešení systému obsahující více snímačů v jednom. Při použití pro zjištění směru příchozího vlnění jsou pro tyto účely asi neoptimálnější. Jejich pořizovací náklady jsou však stále ještě relativně vysoké. Nemáme-li k dispozici požadované finanční zdroje, je ekonomičtější investovat do více samostatných mikrofونů. Jejich použití je však méně efektivnější.

## 6.2 Výběr snímačů pro použití na bezpilotních letounech

V kapitole 6.1 byly představeny základní kritéria pro výběr vhodných snímačů, podle kterých jsem se při výběru řídil. Nároky jsou tedy kladeny na nízkou hmotnost, nízký příkon, odstínění rušivých prvků a větru, kompaktní design, odolnost konstrukce při nárazech způsobených např. přistáváním, aerodynamický tvar a možnost zjištění úhlů přichozích vlnění.

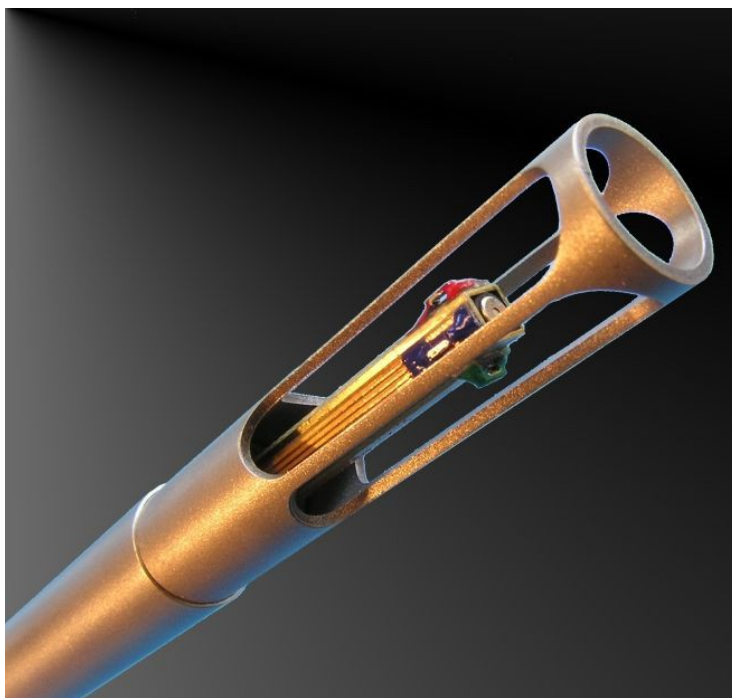
V následující tabulce jsou shrnuty základní parametry vybraných snímačů, které by bylo možné pro daná využití na bezpilotních letounech použít.

Vlastnosti	Snímače AVS Microflown AVISA	Peavey PVR 2	Sennheiser MKH70	AKG CK 69
Typ snímače	Kombinace 3 mikrovláknových snímačů spolu s jedním kondenz.	Kondenzátor	Dynamický	Dynamický 2 kapsle
Frekvenční rozsah	0.1Hz - 20kHz	20 Hz – 20kHz	50 Hz – 20kHz	20 Hz – 18kHz
Směrová charakteristika	Všesměrová	Všesměrová	Úzce směrová (super-kardioda)	Úzce směrová (super-kardioda)
Napájení	18 V DC	9~52 V Phantom	48 V ± 4 V Phantom	ne
Citlivost	55 mV/Pa	14 mV/Pa	50 mV/Pa	27 mV/Pa
Rozměry (tvar)	130 x 12,7 mm v průměru (tyčovitý)	193 x 21mm v průměru (tyčovitý)	410 x 25 mm v průměru (puška)	176 a 317 x 21 mm (puška)
Hmotnost	45 g	150 g	180 g	100 + 70 g
Vlastní šum	zanedbatelný	velmi malý	zanedbatelný	zanedbatelný
Cena	nedostupná (součástí celého systému AVS)	cca. 3 000 Kč	cca. 30 000	cca. 13 000

**Tab.6.1** Porovnání parametrů jednotlivých vybraných snímačů

Při srovnávání jednotlivých druhů a parametrů snímačů jsem dospěl k závěru, že pro dané účely je jako nejlepší řešení vyžití snímačů AVS (Acoustic Vector Sensor) a systému pro zpracování dat od holandské společnosti Microflown AVISA, který byl představen v roce 2002 a který jako jediný využívá snímačů s mikrovláknem.

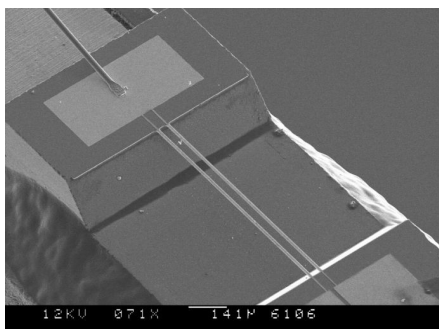
V této kapitole bych rád tento systém spolu se snímači představil, zdůraznil výhody oproti jiným způsobům řešení a navrhl možnosti využití těchto snímačů spolu se systémem pro zpracování dat na bezpilotním letounu.



*Obr. 6.1 Fotografie snímače AVS od společnosti Microflown AVISA*

### **6.2.1 Princip vybraných snímačů**

Zatímco běžné mikrofony převádí akustický signál na elektrický, přičemž membrána vibruje v závislosti na kolísání tlaku vzduchu, snímače Microflown (mikrovlákno) kolísání tlaku vzduchu neměří. Namísto toho měří rychlost proudění vzduchu napříč dvěma miniaturními odporovými vlákny, která jsou vyrobena z platiny, která byla zahřátá na 200°C. V oboru dynamiky tekutin je se pro pohyb tekutin využívá sloveso *téct* (angl. *flow*) z čehož vyplývá název Mircoflown. Rychlost proudění částic (z angl. *particle velocity*) budu dále označovat jako PV. Na obr. 6.2 je detailní snímek platinových vláken, použitých v snímačích.



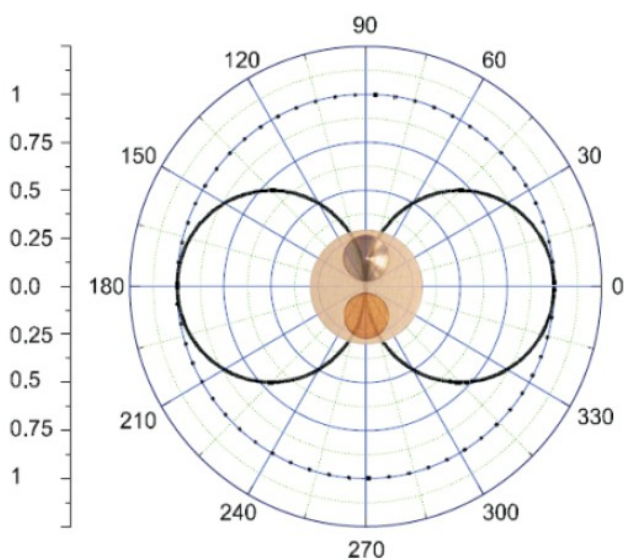
**Obr. 6.2** Detailní snímek platinových mikrovláken, které jsou 400x tenčí než lidský vlas.

Tak jak vzduch proudí přes platinová vlákna, první vlákno ochlazuje a touto tepelnou výměnou se lehce ohřeje. Druhé vlákno se tak ochladí o něco méně. Teplotní rozdíl obou vláken se projeví změnou jejich odporu. Toto generuje rozdíl napětí, který je úměrný rychlosti proudění částic a vytváří se tak směrový účinek těchto snímačů. Pokud se směr proudění obrátí, změní se taktéž rozdíl napětí. Prochází-li přes senzor zvuková vlna, střídavě nepatrně tvaruje mikrovláknem a střídavě tak ovlivňuje napětí.

### 6.2.2 Směrnost vybraných snímačů

Při použití běžných mikrofونů pro účely měření nízkých frekvencí na bezpilotních letounech, neměříme pouze frekvence jednoho zdroje, ale spolu s nimi i ostatní zvuky v pozadí a odrazy zvukových vln.

Použijeme-li mikrovláknové snímače, můžeme měřit pouze frekvenci zdroje nízkofrekvenčního vlnění a to bez rušivých prvků a odrazů. To díky rozdílné polaritě odezvy změn tlaku a rychlosti proudění částic vzduchu na snímačích.



**Obr. 6.3** Směrová charakteristika snímačů AVS.

Rychlost proudění částic je vektorová veličina a je tudíž směrová. Tento směrový efekt dělá z Microflow snímačů snímače mimořádně vhodné pro měření široké škály frekvencí v reálných situacích, ve kterých se vyskytují v pozadí rušivé prvky a odrazy akustických signálů.

Tato informace je takto uvedena v manuálu snímačů. Detailnější rozebrání této směrové vlastnosti a omezení tak vlivu rušivých prvků vyskytujících se v reálných situacích společnost Microflow AVISA není ochotna komentovat. Předpokládám ale, že filtrace těchto rušivých prvků je možná díky softwaru k tomuto systému pro zpracování signálu a vysoké citlivosti těchto snímačů. Taková filtrace jednotlivých zdrojů vlnění je popsána v kapitole 6.2. Např. u rušivých frekvencí od motoru je s konstantní informací o poloze a typu vlnění relativně snadné je do jisté míry odfiltrovat.

Spojením tří navzájem kolmých těchto mikrovláknových snímačů získáváme pole, díky kterému můžeme s přesností až menší než  $2^\circ$  zjistit směr vektoru příchozího vlnění. Se známou výškou a polohou letounu, tak můžeme lokalizovat zdroj vlnění v trojrozměrném prostoru.

### 6.2.3 Specifikace vybraných snímačů

V následujícím přehledu jsou popsány specifikace snímače AVS (Acoustic Vector Sensor) sestaveného z 3 Microflow snímačů a mikrofonu, měřícího akustický tlak.

#### **Fyzikální vlastnosti:**

Průměr:	12,7 mm
Délka:	130 mm
Hmotnost:	45 g

#### **Elektrické vlastnosti:**

Napájení je poskytováno z 4-kanálové zpracovací jednotky MFSC-4 (18V DC)

Vstupní konektory ze snímačů jsou 7-pinové na optickém kabelu LEMO.

#### **Pracovní prostředí**

Maximální pracovní teplota:	60° C
-----------------------------	-------

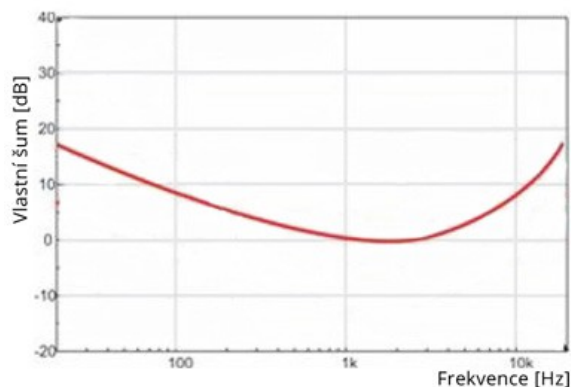
#### **Akustické vlastnosti (mikrofonní snímač)**

Frekvenční rozsah:	20Hz – 20kHz
Horní hladina akustického tlaku:	110 dB

Směrová charakteristika:	všesměrová
Směrovost:	všesměrová

#### Akustické vlastnosti (Microflown snímače)

Frekvenční rozsah:	0.1Hz - 20kHz $\pm$ 1 dB
Horní hladina akustického tlaku:	135 dB
Směrová charakteristika:	osmičková (bi-directional)
Směrovost:	směrové



**Obr. 6.4** Frekvenční závislost vlastního šumu sensorů Microflown

#### 6.2.4 Seznam vybavení k vybraným snímačům

Pokud se rozhodneme k pořízení vybraných snímačů Microflown, jsou součástí systému AVS, který se dodává jako celek a obsahuje:

- snímač AVS (Acoustic Vector Sensor) zabudovaný v odolné kovové trubici
- 4-kanálovou jednotku MFSC-4
- LEMO kabel s 7-pinovými konektory na obou koncích
- napájecí kabel
- odolný přenosový obal na celý systém



**Obr. 6.5** Sada systému AVS Microflown AVISA

### 6.2.5 Připojení vybraných snímačů s napájecí jednotkou

Napájení celého systému vč. samotných snímačů je realizováno na zadní straně jednotky MFSC-4, pomocí dodaného kabelu a při stejnosměrném napětí 18V. Na obr. 6.6 je znázorněn zadní panel jednotky a vyznačen vstup pro napájení.



*Obr. 6.6 Zadní panel jednotky MFSC-4.*

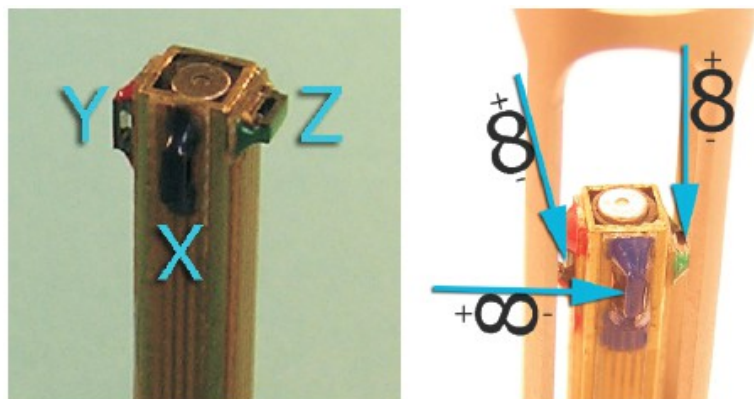
Na přední straně jednotky MFSC-4 se nachází vstup pro 7-pinový LEMO konektor, označený jako vstup sondy (Probe Input). Vyznačen je na obr. 6.7.



*Obr. 6.7 Přední panel jednotky MFSC-4 se znázorněným vstupem pro signál ze snímačů.*



Pro označení orientace jednotlivých snímačů v AVS se využívá barevného označení os. Osa X je značena modře, osa Y červeně a osa Z zeleně. Viz obr. 6.8.



*Obr. 6.8 Barevné znázornění os jednotlivých snímačů na sondě AVS*

#### 6.2.6 Specifikace jednotky pro úpravu signálu ze snímačů

Jednotka MFSC-4 je 4-kanálová jednotka, která má 3 základní funkce – napájení snímačů AVS, předzesílení a možnosti upravení amplitud a fází přijatých signálu elektronicky. K dispozici jsou na jednotce 4 BNC výstupy (*Bayonet Neill–Concelman*). První reprezentuje výstup mikrofonu snímajícího akustický tlak a zbylé 3 signál z Microflown snímačů (U). Tyto výstupy jsou kompatibilní s většinou používané měřící techniky. Pokud není kalibrace možná v uživatelském softwaru je možné signál kalibrovat přímo na této jednotce, pomocí ovládacích prvků na boční straně.



*Obr. 6.9 Jednotka MFSC-4*

**Fyzikální vlastnosti:**

Výška:	110 mm
Šířka:	30 mm
Hloubka:	160 mm
Hmotnost:	437 g

**Vstupy:**

7-pinový konektor LEMO s maximálním vstupním napětím 100 mV pro snímač akustického tlaku a 9 mV pro snímače Microflowm při nastaveném vysokém zisku a 900 mV při nastaveném nízkém zisku.

**Výstupy:**

Výstupní signál o impedanci  $56\ \Omega$  je přenášen pomocí BNC konektorů. Maximální výstupní napětí je 300 mV pro snímač akustického tlaku a 900 mV pro snímače Mikroflowm.

**Napájení:**

Vstupní napětí:	15-18 V
Spotřeba (max.):	1 W (56,7 mA při napětí 18 V)
Průměrná spotřeba:	0.8 W (44 mA při napětí 18 V)
Pojistka:	250 mA

**6.2.7 Připojení snímačů na bezpilotní letoun**

Jelikož toto řešení snímání a měření frekvencí obsahuje v sobě více snímačů, je možné je umístit na bezpilotní letoun na jedno místo. To je velká výhoda oproti použití pole více mikrofonů. Odpadá tak problém s kalibrací vlastního pole mikrofonů.

Nejideálnější použití je umístění na špici letounu (pokud je to možné) spolu s protivětrnou ochranou. Ta sice značně zvyšuje aerodynamický odpor letounu, ale výrazně zlepšuje kvalitu snímaného signálu. Samotná montáž uchycení snímačů závisí na konstrukčních možnostech daného letounu. Příklad upevnění tohoto systému na špici letounu je znázorněno na obr. 6.10.



*Obr. 6.10a Testovací model bezpilotního letounu Skywalker s využitím systému AVS na špici letounu*



*Obr. 6.10b Testovací model bezpilotního letounu Skywalker za letu*

### **6.2.8 Hlavní výhody vybraného systému snímačů**

Hlavními výhodami vybraného systému Microflow AVISA se snímači AVS jsou především:

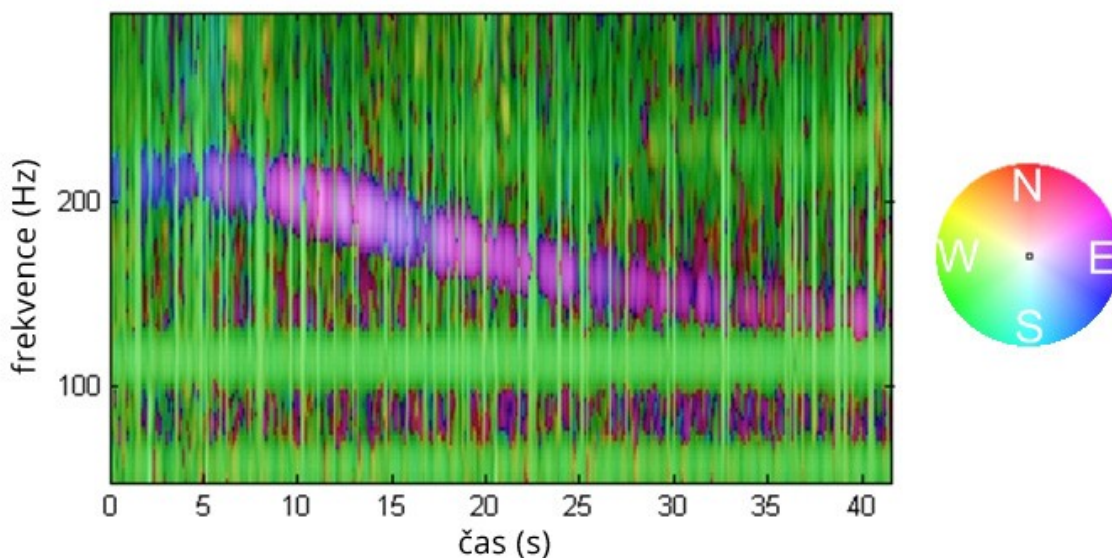
- detekce zdrojů nízkofrekvenčního vlnění s přesností větší než 2°
- široké frekvenční spektrum, které je možno snímat (0,1 Hz – 20+ kHz)
- lehké a odolné provedení konstrukce sondy AVS
- možnost snímání více zdrojů najednou a bez nutné viditelnosti
- možnost vrstvování a tím možnost vyhledávání požadovaných zdrojů vlnění
- snímače Microflow neovlivňují rušivé elementy jako zvuk pozadí, odrazy signálů
- na bezpilotním letounu spolu s kamerou je možné si zjištěnou informaci o poloze zdroje vizuálně potvrdit
- možnost použití jako protisrážkový systém „Hear & Avoid“ nebo pro navádění na přistání (ILS)

### 6.3 Zpracování a vyhodnocení naměřených dat

Zpracování signálu ze snímačů je zapotřebí k převedení snímaných akustických dat do vhodného datového formátu obsahujícího taktéž přesnou informaci o čase nasnímaní daných signálů.

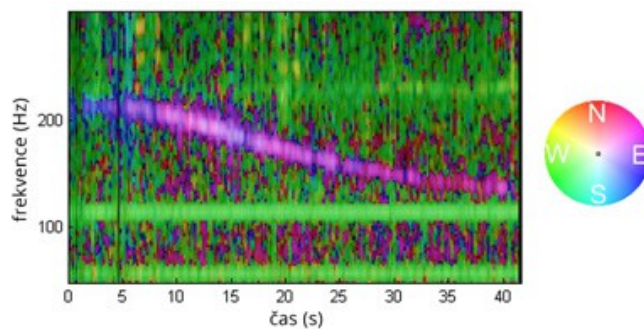
V prvním kroku zkoumáme, zdali přijímaný signál obsahuje prvky, které chceme lokalizovat – např. definované podle, rozsahu frekvencí, délky trvání (střelba) či opakující se frekvence (vrtule jiného letounu). Pokud je detekován signál, který odpovídá těmto přednastaveným limitům je klasifikován a dále předáván na odpovídající výstup. Spojením a kombinací těchto výstupů lze klasifikovat zdroje s větší přesností a také je přesněji lokalizovat.

Na obr. 6.11 je znázorněn výstup z jednotky, který byl pořízen při testovacím přeletu nad vojenskou střelnicí, kde se nacházel také spuštěný malý naftový motor. Osa x znázorňuje časový průběh, osa y frekvenci příchozí vlnění a jednotlivé barvy dle legendy označují směr příchozí vlnění (DOA). [12]



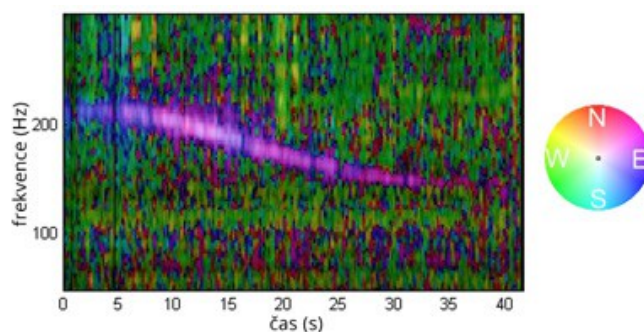
**Obr. 6.11** Znázornění výstupu reprezentujícího časově-frekvenční-DOA záznam [12]

Výstřely jsou vidět jako vertikální linie v tomto grafu. Tyto signály je možné detekovat, klasifikovat a následně filtrovat. Zvukové signály z naftového motoru tvoří dvě vyšší harmonické na 55 Hz a 110 Hz. Zelená barva těchto frekvencí nás informuje o tom, že oba signály pocházejí ze stejného místa na jihozápadě.



**Obr. 6.12** Znáznornění výstupu reprezentujícího časově-frekvenční-DOA záznam po odfiltrování frekvencí způsobených výstřely na střelnici [12]

Taktéž je jednoduché rozpoznat z frekvenčního posuvu způsobeného Dopplerovým jevem výrazný zdroj nízkofrekvenčního vlnění pohybující se z jihovýchodu na severovýchod. Při známé změně DOA, frekvenčního posuvu způsobeného Dopplerovým jevem je již možno vypočítat vzdálenost objektu, výšku a rychlost, popř. zjistit frekvenci motoru pohybujícího se předmětu – v tomto případě letoun ve výšce 1616 m, letící na severovýchod rychlostí 355 km/h.



**Obr. 6.13** Znáznornění výstupu reprezentujícího časově-frekvenční-DOA záznam po odfiltrování frekvencí způsobených výstřely na střelnici a dále statického zdroje (naftový motor) [12]

Klasifikací a přepínáním těchto vrstev můžeme dodat operátorovi v reálném čase informaci o poloze a frekvencích požadovaných zdrojů nízkofrekvenčního vlnění jako:

- impulsivní zdroje vlnění
- rychle pohybující se zdroje vlnění
- pomalu pohybující se zdroje vlnění
- statické zdroje vlnění
- zdroje pouze v určitém úhlovém rozsahu
- zdroje pouze v dané výšce



Je-li opatřen bezpilotní letoun i optickou kamerou, je možné snímané zdroje monitorovat a na výsledném snímku promítat vyhodnocená data.

Na obr. 6.17 jsou na takovém snímku vloženy informace o zdroji vlnění – klasifikace zdroje vlnění, čas a úhlové informace.

Jelikož je zvuk rychlejší než obraz, musíme úhlové informace pro správné zaměření o toto zpoždění opravit. Zpoždění zvukového signálu je možno vypočíst, známe-li vzdálenosti k cíli a rychlosti šíření zvukových vln.



**Obr. 6.14** Grafické promítnutí získaných informací v reálném čase [12]

## 6.4 Další možnosti využití vybraných snímačů

Multifunkčnost vybraných snímačů, dokazuje široká škála dalších možností jejich využití. Rád bych představil alespoň některé z nich.

### 6.4.1 Přistávací asistent

Zajistit automatizované přistání bezpilotních letounů je relativně obtížné, protože mnoho druhů výškových snímačů na letounu je zatíženo nezanedbatelnou chybou. Např. při použití sonaru se setkáváme s problémem, pokud přistáváme na strukturovaný povrch, např. trávu. Taktéž použití laserových a infračervených snímačů je omezeno světelnými podmínkami a při použití venku např. za slunečných dnů není příliš vhodné. V kombinaci s inerciálními sensory a kamerami již mohou poskytovat dostatečně přesnou

informaci o výšce. Nicméně algoritmy, které zpracovávají tyto informace, jsou velice náročné a tudíž i nákladné.

Využitím vybraných snímačů AVS je možno docílit detekce několika zdrojů akustických signálů v 3D prostoru. Přistává-li letoun, odrazy vlnění, způsobeného vrtulí, od země, je možno detekovat a dle zjištěných úhlů vypočítat výšku letounu. Tento způsob využití závisí na druhu přistávacího povrchu. Je také nutné, aby byl po dobu přistání napájen motor letounu.

Další metodou je umístění definovaného zdroje vlnění na zemi, a protože jsou schopny snímače AVS vypočítat DOA tohoto vlnění, je z jejich pomoci možné určit výšku a umístění letounu nad přistávací plochou. Pro relativně přesné přistání postačí i 1W reproduktor. Toto využití systému je možné i pro přistání na pohybujících se přistávacích plochách.

#### **6.4.2 Protisrážkový systém**

Protisrážkové systémy Sense and Avoid můžeme obecně rozdělit na pasivní a aktivní, dle toho, zda daný systém vyhodnocuje signály vyvolané samotnou přítomností cíle (pasivní), nebo aktivně zjišťuje přítomnost cílů vysláním signálu, čekáním na odezvu, a vyhodnocením přítomnosti cíle na základě porovnání vyslaného a přijatého signálu.

Letoun vybavený snímači AVS lze využít jako pasivní radar, který je schopen detekovat i rychle se pohybující se létající předměty, za podmínky, že jsou samy zdrojem vlnění (např. jiná letadla, helikoptéry) a následně vyhodnotit získaná data a navrhnout možný úhybný manévr. Dle naměřených frekvencí lze dle definovaných parametrů takto tyto zdroje klasifikovat a např. určit o jaký typ letadla se jedná.

#### **6.4.3 Snímač turbulencí**

Turbulence mohou často výrazně zkomplikovat let obzvláště pomalu se pohybujícím bezpilotním letounům. Vnitřní snímače jsou schopny snímat pouze důsledky turbulencí, ale ne je samotné. Snímače pro měření rychlosti proudění částic, použité v AVS jsou schopny taktéž měřit stejnosměrný proud. Další dva senzory, které jsou kolmo k dráze letu, mohou být použity, pro určení, zdali se jedná o turbulenci zleva-doprava nebo zprava-doleva. Tato myšlenka detekce turbulencí doposud testuje.

#### 6.4.4 Snímání rychlosti

Informaci o vzdušné rychlosti běžně získáváme z Pitotovy trubice umístěné na letounu. K zjištění této informace je možno taktéž využít velmi citlivé Microflow snímače, které pokud se letoun blíží přímo ke statickému zdroji vypočítá ze změny DOA rychlost letounu.

### 6.5 Použitelnost dalších vybraných snímačů

V tabulce 6.1 jsou uvedeny i typy nízkofrekvenčních snímačů s úzce směrovou charakteristikou. Jejich využití na bezpilotních letounech je možné a v případě omezeného rozpočtu na takový systém mohou posloužit jako možná alternativa.

Při umístění pole těchto směrových mikrofónů na kostru bezpilotního letounu na jednu stranu zamezíme vlivu rušivých prvků vyskytujících se za letu, ale na druhou stranu značně omezíme snímací rozsah.

Ukázka umístění podobného pole směrových snímačů na bezpilotním letounu je na obrázku 6.15. Jedná se o prototyp bezpilotního letounu se systémem LOCAS vyvíjeným společností SARA Inc. (Scientific Applications and Research Associates, Incorporated) v projektu Passive Acoustic non-cooperative Collision-Alert System (SARA PANCAS). Ten vyústil v realizaci systému Low Cost Scout UAV Acoustic System (LOSAS). Tento systém sestává ze 4 velmi lehkých akustických senzorů rozmístěných na křídle UAV o rozměrech RC modelu a digitálního procesoru umístěného v trupu. Senzory jsou odstíněny od proudu vzduchu a jsou na závěsech tlumících vibrace od letadla. Digitální procesor filtruje přijímaný zvuk a porovnává fázové rozdíly mezi jednotlivými přijatými signály. Tento hyperbolický systém je s výhodou používán u vojenských mikrovlnných přehledových radarů. Informace o poloze cílů mohou být v případě pilotovaných letadel zobrazeny přímo v kokpitu, v případě bezpilotních letadel jsou datovým spojem posílány do GCS a zobrazeny operátorovi. Jedná se o systém, který je schopen detekovat zdroje akustického vlnění a s příkonem 7W na napájecím napětí 6V váží zhruba 250g,



**Obr. 6.15** Ukázka rozložení pole směrových mikrofónů na bezpilotním letounu se systémem LOCAS



Směrové mikrofony na křídlech tohoto dvouplošníku jsou schopny detekovat akustické zdroje až v rozsahu 2 km. Pro přesné určení polohy na takovou vzdálenost je však nutný alespoň relativně hlasitý akustický zdroj. Uplatnění tak najdou spíše ve vojenském průmyslu, kde se v současné chvíli značně investuje do podobných systémů, které dokáží posloužit jako pasivní akustický radar,

Soukromá společnost SARA Inc. bohužel není ochotna poskytovat technické specifikace a bližší charakteristiky těchto vyvíjených systémů. Je proto možnou alternativou využití vlastních směrových mikrofونů, konfigurace vlastního pole snímačů na bezpilotním letounu a vývoj vlastního řešení přenosu a zpracování nasnímaných signálů, což v konečném důsledku prakticky může být dražší než investice do, již pro tyto účely vyvíjených, systémů (AVS, LOCAS) .

Pokud našim cílem není monitorovat směr přichozícího vlnění a tak rychleji detekovat akustický zdroj, náklady na takový systém nemusí být velké. Např. při použití 2x2 kapslí úzce směrových mikrofونů AKG CK69, které jsou velice odolné, mají vysoký zisk, citlivost a zanedbatelný vlastní šum je možno cca. za 26 000 Kč vybavit letoun těmito snímači. Pokud je zabezpečen rádiový přenos mezi letounem vybaveným těmito snímači, není již náročné nasnímaný signál zesílit, přenést a následně zpracovat v pozemní stanici. Spolu s informací o poloze letounu tak můžeme oblast, vymezenou směrovou charakteristikou snímačů, monitorovat.

Ideální vzdálenost pro snímání zvuků generovaných člověkem (řeč) je 10m což vzhledem k možné trajektorii letu letounu pro stálé monitorování statického zdroje není zcela praktické. Je však možné využití těchto snímačů např. na malých bezpilotních helikoptérách, které jsou schopny si udržet si relativně stálou pozici vůči snímanému akustickému zdroji.



*Obr. 6.16 Možnost umístění směrových mikrofونů na bezpilotní helikoptéru*

## 7 ZÁVĚR

V této bakalářské práci jsem se snažil objasnit problematiku snímání nízkých frekvencí na dálku pomocí snímačů na bezpilotních letounech. K tomu bylo zapotřebí se v první řadě seznámit se základními pojmy z oblasti elektroakustiky, která se v obecné rovině zabývá vlastnostmi, snímáním a zpracováním zvuku.

Po seznámení se s těmito základními pojmy jsem dále popisoval principy, typy a charakteristiky nízkofrekvenčních snímačů (mikrofonů) a na základě těchto informací jsem v dalších částech již byl schopen výběru použitelných snímačů pro využití při snímání na dálku. Věděl-li jsem již o možnostech snímání, dalším úkolem bylo zjistit, jak nasnímaný signál zpracovat a vyhodnocovat. Věnoval jsem tudíž v teoretické části kapitoly možnostem měření nízkých frekvencí. Přínosem k pochopení další problematiky bylo také předvedení testovací ukázky pole mikrofonů, pomocí kterého je možné, metodou časových zpoždění, určit polohu zdroje nízkofrekvenčního vlnění.

Jelikož cílem práce nebylo pouze seznámení se s možnostmi měření nízkých frekvencí, ale také vlastní návrh řešení pro snímání na dálku, bylo nutné sestavit kritéria pro výběr takových snímačů – systém snímačů. Mezi hlavními kritérii při výběru byly frekvenční charakteristika, směrová charakteristika, citlivost, zisk, konstrukce a cena vybraných snímačů.

Při výběru jsem narazil jak na samostatné mikrofony, které by bylo možné v určitých situacích použít, tak na, již komplexně pro tyto účely vyvíjené, systémy. Parametry jednotlivých snímačů jsem porovnal a zanesl do tabulky.

Především mě zaujal systém AVS (Acoustic Vector Sensor) od holandské společnosti Microflown AVISA. Tento systém kombinuje běžný mikrofón pro měření akustického tlaku spolu se 3, navzájem kolmými, mikrovláknovými snímači. Pomocí takovéto sondy jsme schopni snímat a detekovat směr přichozího vlnění ze všech směrů. Navíc je vyrobena z odlehčených materiálů a mechanicky velice odolná. Ve všech ohledech, krom pořizovacích nákladů, tyto snímače předčí konkurenční systémy snímačů.

Hlavními výhodami tohoto systému jsou detekce zdrojů širokého spektra nízkofrekvenčního vlnění s přesností větší než  $2^\circ$ , lehké a odolné provedení, možnost snímání a zpracování několika několika akustických zdrojů najednou a pomocí vrstev oddělovat, či vyhledávat jednotlivé zdroje, popř. filtrovat nežádoucí vlivy. Tento systém AVS se v současné době hojně využívá ve vojenství a především právě k monitorování

akustických zdrojů, jako letadla, vozidla, střely apod. V civilním využití dobře poslouží např. protisrážkový systém (sekundární), či přistávací asistent.

Na druhé straně jsou jmenovány ve výběru samostatné snímače (mikrofony) s úzce směrovou charakteristikou, horšími frekvenčními, konstrukčními a výkonovými parametry než AVS, avšak stále v hranicích použitelnosti. Mohou totiž posloužit jako možná alternativa pro další možnosti využití. Tyto mikrofony typu puška lze rozmístit na křídla letounu či spodní části helikoptéry a při vytvoření pole alespoň 4 mikrofونů lze snímat dostatečně velkou plochu a navíc díky vysoké směrovosti těchto mikrofونů efektivně zamezit vlivu nežádoucích rušivých prvků. Díky takto vytvořenému poli snímačů jsme do jisté míry takéž zjišťovat polohu zdroje vlnění metodou časových zpoždění. Pro zpřesnění této informace bych však doporučoval použití více takových snímačů.

Jako možné řešení pro tyto účely mi přišly konkrétně 2 x 2 mikrofony AKG CK 69. Jsou velice odolné, relativně levné a mají výborné směrové a frekvenční vlastnosti. Samotné zpracování a měření frekvencí je možné dle velikosti a výkonu letounu přímo v letounu, nebo při dostatečně výkonném bezdrátovém spojení na pozemní stanici. Poněkud dražší, avšak konstrukčně, frekvenčně a citlivostně o něco kvalitnější alternativou, by mohly sloužit zmíněné mikrofony Sennheiser MKH70. Jejich nákup, obzvláště, chtěli bychom vytvořit dostatečně spolehlivé pole mikrofونů, by se pravděpodobně nevyplatil.

Je-li cílem monitorovat a např. zaznamenávat či následně reprodukovat zvuk statického zdroje vlnění, je možné použití směrových akustických snímačů na bezpilotní helikoptěře. Doporučená vzdálenost, pro snímání v použitelné kvalitě je 10 m.

V závěru bych chtěl zdůraznit důležitost investice do výzkumu těchto snímačů, neboť praktických využití těchto systémů je celá řada, a to, jak, v dnešní době tradičně podporovaném vojenském průmyslu, tak pro civilní účely. Jako jednička na trhu s těmito systémy s nejširšími možnostmi využití mi přijde již zmíněná holandská společnost Microflown AVISA. Dostupnost a cena těchto systémů je na vyžádání. V případě jejich výběru doporučuji ještě u výrobce konzultovat jejich použitelnost pro konkrétní využití.

## **8 ZHODNOCENÍ CÍLE PRÁCE**

V této bakalářské práci se mi podařilo seznámit se s problematikou snímání nízkých frekvencí na dálku a jejich měření. Díky základním znalostem pojmů a principů elektroakustiky z teoretické části, jsem byl v praktické části schopen zvážit kritéria pro výběr vhodných nízkofrekvenčních snímačů a následně vybrat několik konkrétních typů a rozebrat detailněji možnosti jejich použití pro snímání na dálku z bezpilotního letounu.

# SEZNAM TABULEK

*Tab. 2.1 Rychlost šíření zvuku v některých prostředích*

*Tab. 2.2 Přehled hodnot hladin intenzity zvuku*

*Tab. 2.3 Přehled parametrů zdrojů nízkofrekvenčních signálů*

*Tab. 3.1 Srovnání vlastností jednotlivých směrových charakteristik*

*Tab. 6.1 Porovnání parametrů jednotlivých vybraných snímačů*

## SEZNAM OBRÁZKŮ

**Obr. 2.1** Blokové schéma elektroakustického řetězce se snímačem zvuku, předzesilovačem, dolní propustí, sloužící jako filtr vysokých frekvencí; vzorkovacími obvody, analogově digitálním převodníkem a zapisovačem na CD

**Obr. 3.1.** Ukázka směrové charakteristiky s rozdělením pro jednotlivá frekvenční pásma

**Obr. 3.2** Všesměrová neboli kulová charakteristika (omni-directional) se znázorněním frek. pásem

**Obr. 3.3** Osmičková charakteristika (bi-directional) se znázorněním frekvenčních pásem

**Obr. 3.4** Kardiovídná neboli ledvinová charakteristika (cardioid) se znázorněním frek. pásem

**Obr. 3.5** Superkardiovídná charakteristika (super-cardioid)

**Obr. 3.6** Frekvenční charakteristika mikrofonu

**Obr. 3.7.** Schéma a princip uhlíkového mikrofonu [4]

**Obr 3.8** a) Schéma uspořádání elektrodynamického mikrofonu s membránou; b) Konstrukce gradientního elektrodynamického mikrofonu [1]

**Obr. 3.9** Principiální schéma uspořádání páskového mikrofonu

**Obr. 3.10** Schéma zapojení elektrostatického mikrofonu

**Obr. 3.11** Princip elektrového mikrofonu s pevnou elektrovou elektrodou [4]

**Obr. 3.12** Schéma piezoelektrického mikrofonu

**Obr. 3.13** Souprava HME 15-KA (Sennheiser electronic)

**Obr. 4.1** Schéma přímého měření frekvence

**Obr. 4.2** Porovnání průběhu signálu před a za tvarovacím obvodem vstupního signálu [9]

**Obr. 4.3** Blokové schéma zapojení obvodu pro měření časového intervalu [9]

**Obr. 4.4** Schématická značka osciloskopu

**Obr. 4.5** Ukázky režimů dvoukanálového osciloskopu

**Obr. 4.6** Blokové schéma klasického osciloskopu [12]

**Obr. 4.7** Sonda HI-362A pro měření nízkých frekvencí

**Obr. 5.1** Schéma experimentálního mikrofonového pole [2]

**Obr. 5.2** Navržené experimentální mikrofonové pole a záznamové zařízení [2]

**Obr. 5.4** Rozdíl vzdáleností signálu dopadajícího na dvojici senzorů. [2]

**Obr. 6.1** Fotografie snímače AVS od společnosti Microflown AVISA

**Obr. 6.2** Detailní snímek platinových mikrovláken, které jsou 400x tenčí než lidský vlas.

**Obr. 6.3** Směrová charakteristika snímačů AVS.

**Obr. 6.4** Frekvenční závislost vlastního šumu senzorů Microflown

**Obr. 6.5** Sada systému AVS Microflown AVISA

**Obr. 6.6** Zadní panel jednotky MFSC-4.

**Obr. 6.7** Přední panel jednotky MFSC-4 se znázorněným vstupem pro signál ze snímačů.

**Obr. 6.8** Barevné znázornění os jednotlivých snímačů na sondě AVS

**Obr. 6.9** Jednotka MFSC-4

**Obr. 6.10a** Testovací model letounu Skywalker s využitím systému AVS na špici letounu

**Obr. 6.10b** Testovací model bezpilotního letounu Skywalker za letu

**Obr. 6.11** Znáznornění výstupu reprezentujícího časově-frekvenční-DOA záznam

**Obr. 6.12** Znáznornění výstupu reprezentujícího časově-frekvenční-DOA záznam po odfiltrování frekvencí způsobených výstřely na střelnici

**Obr. 6.13** Znáznornění výstupu reprezentujícího časově-frekvenční-DOA záznam po odfiltrování frekvencí způsobených výstřely na střelnici a dále statického zdroje

**Obr. 6.14** Grafické promítnutí získaných informací v reálném čase

**Obr. 6.15** Ukázka rozložení pole mikrofonů na bezpilotním letounu se systémem LOCAS

**Obr. 6.16** Možnost umístění směrových mikrofonů na bezpilotní helikoptéru

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Wirsum, S. *Abeceda NF techniky*. 1. vyd. BEN – technická literatura, 1998. 191 s. ISBN 80-86056-26-0
- [2] Eksler, V., Ing. *Lokalizace zdroje vlnění polem mikrofonů v trojrozměrném prostoru* [online]. 2004, [cit. 2012-04-01]. Dostupný z WWW: <<http://www.elektrorevue.cz/clanky/04051/index.html>>
- [3] Škvor, Z. *Elektroakustika a aplikovaná akustika*. 2. vyd. ČVUT, 1999. 130 s. ISBN 80-01-01908-X
- [4] Orság, P.. *Měření základních charakteristik mikrofonů* [online]. 2011, [cit. 2012-03-14]. Dostupný z WWW <[http://vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=49040](http://vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=49040)>
- [5] Bernat, P., Ing. *Akustika, vznik a šíření zvuku, frekvenční analýza a syntéza, sluchový vjem zvukového signálu* [online]. 2011, [cit. 2012-04-13]. Dostupný z WWW: <[http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly\\_akustika.htm](http://homen.vsb.cz/~ber30/texty/varhany/anatomie/pistaly_akustika.htm)>
- [6] Steiner, D. *Akustika* [online]. 2011, [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.steiner.cz/david/akustika/>>
- [7] *Encyklopedie fyziky* [online]. 2011, [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/208-zakladni-definice> >
- [8] Zástěra, J. *Směrové a frekvenční charakteristiky mikrofonů* [online]. 2006, [cit. 2012-03-11]. Dostupný z WWW: <<http://www.janzaudio.com/clanky/smerove-a-frekvencni-charakteristiky-mikrofonu.html> >
- [9] Dřínovský J. *Měření frekvence a času* [online]. 2011, [cit. 2012-03-13]. Dostupný z WWW: <[www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=MREM\\_2010\\_P\\_07.pdf](http://www.urel.feec.vutbr.cz/~drinovsky/?download=MREM_2010_P_07.pdf) >
- [10] Smílek, J. *Osciloskopy* [online]. 2011, [cit. 2012-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.jsmilek.cz/skripta%20pdf/mereni%204%20osciloskopy%20skripta.pdf>>



- [11] Dušek, T. *Zdroje nízkofrekvenčního signálu* [online]. 2011, [cit. 2012-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://nf.duseknet.com/zdroje.htm>>
- [12] Behrman, B. Acoustic vector sensors [online], [cit. 2013-03-15]. Dostupný z WWW: <<http://www.microflown-avisa.com/acoustic-vector-sensors/>>
- [13] Peavey Electronics Corporation, *PVR 2 Measurement microphone* [online], [cit. 2013-04-01], Dostupný z WWW: <[http://images4.thomann.de/pics/atg/atgdata/document/specs/250667\\_peavey\\_pvr2.pdf](http://images4.thomann.de/pics/atg/atgdata/document/specs/250667_peavey_pvr2.pdf)>
- [14] Sennheiser microphones, [online], [cit. 2013-04-01], Dostupný z WWW: <<http://en-de.sennheiser.com/>>
- [15] SARA, Inc., *Acoustic Sensors for Unmanned Air Vehicles*, [online], [cit. 2013-04-01], Dostupný z WWW: <[http://www.sara.com/ISR/acoustic\\_sensing/LOSAS.html](http://www.sara.com/ISR/acoustic_sensing/LOSAS.html)>
- [16] AKG, *CK69 ULS microphone*, [online], [cit. 2013-04-01], Dostupný z WWW: <<http://www.akg.com/CK69+ULS-790.html?pid=1102>>

## **SEZNAM PŘÍLOH**

*Tato práce neobsahuje žádné přílohy.*